



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

# NÁVRH SKLADOVACÍCH KONTEJNERŮ PRO PRÁŠKOVÉ KOVY

DESIGN OF STORAGE CONTAINERS FOR POWDERED METAL MATERIALS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

ONDŘEJ VAVERKA

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. DANIEL KOUTNÝ, Ph.D.

BRNO 2015



Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování

Akademický rok: 2014/2015

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Ondřej Vaverka

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Základy strojního inženýrství (2341R006)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Návrh skladovacích kontejnerů pro práškové kovy**

v anglickém jazyce:

### **Design of storage containers for powdered metal materials**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je konstrukční návrh skladovacích kontejnerů pro práškové kovy s těmito parametry: hmotnost náplně 100 kg, přívod inertní atmosféry, připojení na standardní kontejnery, mechanické ovládání ventilů, transportovatelné.

Cíle bakalářské práce:

Bakalářská práce musí obsahovat: (odpovídá názvům jednotlivých kapitol v práci)

1. Úvod
2. Přehled současného stavu poznání
3. Analýza problému a cíl práce
4. Koncepční řešení
5. Konstrukční řešení
6. Diskuze
7. Závěr
8. Seznam použitých zdrojů

Forma práce: průvodní zpráva, výkresy součástí, výkres sestavení, digitální data

Typ práce: konstrukční; Účel práce: výzkum a vývoj

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 - 20 stran textu bez obrázků).

Zásady pro vypracování práce:

[http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP\\_DP/Zasady\\_VSKP\\_2015.pdf](http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2015.pdf)

Šablona práce: [http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/UK\\_sablona\\_praci.zip](http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/UK_sablona_praci.zip)

Seznam odborné literatury:

SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS. Konstruování strojních součástí. 1. vyd. Editor Martin Hartl, Miloš Vlk. Brno: VUTUM, 2010, 1159 s. ISBN 978-80-214-2629-0.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Daniel Koutný, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 5.11.2014

L.S.

---

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.  
Ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
Děkan fakulty

## **ABSTRAKT:**

Tato bakalářská práce se zabývá konstrukcí zásobníku na práškové kovy, určených do 3D tiskárny. Obsahuje stručný přehled možností v oblasti skladování práškových kovů, konkrétní požadavky SLM pracoviště a následnou analýzu celé problematiky. Na jejím základě jsou formulovány cíle práce. Ta se dále zabývá různými variantami řešení a jejich zhodnocením. V závěrečné části je popsána konečná verze, včetně potřebných výpočtů a výkresové dokumentace.

## **KLÍČOVÁ SLOVA:**

Zásobník, práškový kov, inertní atmosféra,

## **ABSTRACT:**

This bachelor's thesis deals with design of storage container for powdered metal materials used in 3D printer. It contains a short overview of possibilities in metal powders storage, SLM workplace's requirements and analysis of this problem. Based on this, the goals are specified. The work deals with various solutions and their assessments. In the last part the final version is described, including necessary calculations and drawings.

## **KEY WORDS:**

Storage container, metal powder, inert atmosphere



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE:**

VAVERKA, O. *Návrh skladovacích kontejnerů pro práškové kovy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 58 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Daniel Koutný, Ph.D..





### **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ:**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci na téma *Návrh skladovacích kontejnerů pro práškové kovy* vypracoval samostatně za použití uvedené literatury a zdrojů pod odborným vedením pana Ing. Daniela Koutného Ph.D..

V Brně dne 22. května 2015

.....



## **PODĚKOVÁNÍ:**

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří mi pomohli s mou bakalářskou prací, ať již radou, bystrým postřehem či motivací. Zvláště bych chtěl poděkovat panu Ing. Danielu Koutnému Ph.D. za odborné vedení a konstruktivní připomínky. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat své rodině za neochvějnou podporu.

---

**OBSAH**

---

<b>OBSAH</b>	<b>12</b>
<b>ÚVOD</b>	<b>14</b>
<b>1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ</b>	<b>15</b>
1.1 Bezpečnost při skladování sypkých materiálů v zásobnících	15
1.1.1 Hliník	15
1.1.2 Titan	16
1.1.3 Zásady hašení práškových kovů	16
1.2 Zásobníky	16
1.2.1 Rozdělení zásobníků	16
1.3 Situace na trhu	18
1.3.1 Plastové nádoby	18
1.3.2 Kovové nádoby	19
1.3.3 Celé zařízení	20
<b>2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE</b>	<b>21</b>
2.1 Nevhodnost nabízených kontejnerů	21
2.2 Základní předpoklady a zhodnocení problematiky provozu	21
2.2.1 Rozměry a tvar	21
2.2.2 Nosnost a pevnostní výpočty	21
2.2.3 Inertní atmosféra	22
2.2.4 Způsob plnění a vyprazdňování	22
2.2.5 Měření obsahu	24
2.2.6 Nosná konstrukce	24
2.2.7 Mobilita a úspora místa	25
2.3 Cíle práce	25
<b>3 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ</b>	<b>26</b>
3.1 Zásobník	26
3.1.1 Přichycení k rámu	26
3.1.2 Utěsnění víka	28
3.2 Přístupy ke zjišťování obsahu zásobníku	30
3.2.1 Vizualní měření hladiny pomocí průhledítka	30
3.2.2 Vizualní měření hladiny pomocí okénka	31
3.2.3 Měření hladiny pomocí měření hmotnosti	31
3.2.4 Měření hladiny pomocí kapacitních hladinoměrů	31
3.3 Přívod inertní atmosféry	32
3.4 Rám	33
3.4.1 Varianty rámu	34
3.4.2 Spojení nádob	34
<b>4 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ</b>	<b>36</b>
4.1 Koncepce zásobníku	36
4.2 Rozměry zásobníku	36
4.3 Pevnostní výpočty - analytické	41
4.4 Pevnostní výpočty – Metoda konečných prvků	44
4.5 Spojení nádob a způsob určování obsahu	46
4.6 Rámová konstrukce	47
4.7 Inertní atmosféra	50
<b>5 DISKUZE</b>	<b>51</b>

<b>6 ZÁVĚR</b>	<b>52</b>
<b>7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ</b>	<b>53</b>
<b>8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN</b>	<b>55</b>
<b>9 SEZNAM OBRÁZKŮ</b>	<b>57</b>
<b>10 SEZNAM PŘÍLOH</b>	<b>58</b>

---

## ÚVOD

V dnešní době je na vzestupu technologie 3D tisku. Její výrobní potenciál je zatím využíván pouze omezeně a to zejména z ekonomických důvodů. Použití aditivních technologií je v současnosti zaměřeno zejména na výrobu prototypů, modelů, designových demonstrátorů a součástí v malých sériích. Širší laické veřejnosti je známa hlavně díky tisku plastu, ale nejnovějším trendem v tomto odvětví je tisk z kovových prášků. Existuje zde několik technologických přístupů. Jedním z nich je SLM (Selective Laser Melting) jehož princip činnosti spočívá ve spékání tenkých vrstev metalického prášku laserovým paprskem. Takto vyrobené díly jsou již plnohodnotné strojní součásti.

S výrobou pomocí 3D tisku jsou spojeny velice specifické výhody, ale také omezení. Jednou z nesporných výhod je možnost snadné výroby vnitřních dutin. Ty jsou jinou technologií jen obtížně vyrobitelné nebo je jejich výroba úplně nemožná. Na druhou stranu může mít 3D tisk problém s některými tvarovými prvky, které sice dokáže vytvořit, ale ve značně zhoršené kvalitě. Pokud se tyto výhody a nevýhody spojí s digitální optimalizací struktur, mohou vznikat výrobky s velmi nízkou hmotností a přitom s mechanickými vlastnostmi srovnatelnými se součástmi vyrobenými klasicky, třeba přesným odléváním. Ve spojení s lehkými materiály a strukturální optimalizací má tato technologie velký potenciál např. v kosmickém vývoji, kde je již intenzivně testována.

Technologie SLM využívá nejčastěji hliníkový, titanový nebo nerezový prášek. Ten je od výrobců dodáván v poměrně malých plastových nádobách. Ty jsou vhodné pro transport, ale jsou nevyhovující z hlediska dalšího skladování. Jednak při uložení zabírají mnoho místa a navíc jejich konstrukce nezajišťuje dlouhodobé udržení požadované jakosti kovového prášku.

Při skladování většiny prášků je nutné zamezit styku se vzdušnou vlhkostí popřípadě kyslíkem, protože jsou za určitých okolností výbušné. Nejvhodnější je skladování v inertní atmosféře, což plastové nádoby sice umožňují, ovšem v místních podmínkách není možné s takovým materiálem efektivně pracovat. Nelze totiž při manipulaci s práškem zamezit nadměrnému styku se vzduchem.

Na Fakultě strojní VUT v Brně se využívá zařízení SLM® 280 HL, které umožňuje tisknout výrobky do rozměrů 280×280×350 mm. V případě potřeby tisku velké součásti a zaplnění celého stavebního prostoru, je nutné mít k dispozici až 75 kg hliníkového prášku. Ten se musí přesypávat z plastových nádob do kontejnerů určených k dávkování do stroje. Provádění této operace bez inertní atmosféry může být rizikové, protože při rozptýlení většího množství reaktivního metalického prášku ve vzduchu může vzniknout výbušná směs. Obsluha je také vystavena zvýšenému kontaktu s práškem a je zapotřebí používat ochranné pomůcky a bezpečné pracovní postupy.

Potřeba uchovávat kovový prášek v dostatečném množství, v inertní atmosféře a s možností jej pod touto atmosférou dávkovat vedla k rozhodnutí o vývoji zásobníku, který by všechny tyto parametry splňoval a jeho provoz by byl v souladu se všemi požadavky na bezpečnost a ekologii ve skladovacích prostorech.

## 1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

---

**1**

Hliníkový prášek není podle podkladů výrobce [1] označován za nebezpečnou látku a tudíž nepodléhá žádným speciálním normám na skladování nebo transport. Skladování ovšem musí splňovat jisté bezpečnostní a zdravotní předpisy.

### 1.1 Bezpečnost při skladování sypkých materiálů v zásobnících

---

**1.1**

Skladování sypkých materiálů může vést k úrazům a to i smrtelným. Nejčastěji dochází k propadnutí člověka do skladovaného materiálu nebo jeho zasypání. Dalšími důvody jsou zřícení zásobníku nebo jeho části v důsledku špatného technického stavu, popřípadě exploze skladovaného materiálu.

První dva zmiňované a nejčastější důvody úrazů jsou typické pro zásobníky velkých rozměrů, kdy je nutný, například z důvodu údržby, vstup obsluhy do zásobníku. [2]

V tomto případě to nehrozí, neboť zásobník je pouze malých rozměrů. O to více se musí dbát na možnost výbuchu, neboť jak hliník, tak titan jsou ve své práškové formě velice hořlavé.

#### 1.1.1 Hliník

---

**1.1.1**

Hliník jako prvek má velkou afinitu ke kyslíku. V normálních podmínkách se jeho povrch pokrývá vrstvou oxidu, který je inertní a chrání zbytek součásti. V práškové formě má ovšem hliník vzhledem ke svému objemu velkou plochu, na které může reagovat s kyslíkem. Pokud dojde k zahřátí na tzv. zápalnou teplotu je reakce velmi rychlá a zoxiduje prakticky celá částice najednou. Toto vede k hoření. V horším případě je hliníkový prach rozptýlen ve vzduchu a vytváří oblak. Za takových podmínek nenásleduje hoření, ale výbuch. Nejčastějším zdrojem ohřátí je jiskra nebo výboj statické elektřiny.

Zásady skladování a nakládání s práškovým hliníkem:

- 1) Vyhnout se jakémukoliv způsobu manipulace, který by vedl k rozptýlení prášku do vzduchu.
- 2) Eliminovat všechny zdroje jisker, nebo ohně v okolí skladovaného materiálu. Typický je zákaz kouření v těchto prostorách.
- 3) Eliminovat zdroje statické elektřiny, tzn. uzemněné přístroje, využívat vodivé pomůcky a nástroje při manipulaci, u kterých nehrozí vznik statického náboje.
- 4) Pokud to není nutné, neotevírat zásobníky a nechat je utěsněné.
- 5) Velmi se doporučuje použití ochranné inertní atmosféry v zásobníku i v zařízeních, které s práškovým hliníkem pracují. [3]

### 1.1.2 Titan

Titan je v práškové podobě velice reaktivní kov. Je velice citlivý na zapálení ve vzduchu pomocí elektrostatického výboje. K jeho vznícení stačí velice malá energie.

Zásady skladování a nakládání s práškovým titanem:

- 1) Titanový prášek musí být skladován v uzavřených a dobře utěsněných nádobách.
- 2) V místnostech, kde je skladován se nesmí nacházet zdroj vysoké teploty nebo jisker. Nesmí se zde svařovat, brousit, kouřit atd.
- 3) Doporučuje se vypnout v těchto místnostech automatické hasící zařízení, protože hořící titan velice silně reaguje s vodou, která podporuje jeho hoření.
- 4) Při manipulaci s titanovým práškem musí být všechny přístroje uzemněny, nástroje by měly být vodivé nebo z materiálu, který neindukuje statický náboj.
- 5) Při skladování a manipulaci se silně doporučuje použití inertní atmosféry. [4]

### 1.1.3 Zásady hašení práškových kovů

Práškové kovy se nesmí hasit vodou, oxidem uhličitým, chloridem uhličitým nebo jinými halony. Se všemi těmito látkami mohou práškové kovy reagovat a např. voda se rozkládá při této reakci na vodík a kyslík. Vodík se dále vzněcuje a hoření se periodicky opakuje.

Doporučeným hasivem jsou suchý písek, suchý grafit, suchý cement, zemina, NaCl, prášek s grafitem nebo speciální hasící prášky.

Často se požár nedá uhasit a tak se pouze ohraničí s cílem minimalizovat následné škody. [5]

## 1.2 Zásobníky

Dle [6] je zásobník konstrukce pro skladování zrnitých tuhých látek (jako bunkr nebo silo). Tyto látky jsou v něm uskladněny tak, že jsou chráněny proti vnějším vlivům (povětrnostní vlivy, znečištění od okolí). Jsou tudíž vhodné pro skladování materiálů, které mají nějaká specifická pravidla pro uskladnění nebo musí splňovat určité jakostní parametry. Lze je použít například pro uskladnění látek, které nesmí být na vzduchu, na přímém slunečním světle, nesmí navlhnout, jsou výbušné, atd.

### 1.2.1 Rozdělení zásobníků

Dnes již neplatná česká norma ČSN 73 5570 [6] zaváděla pojem buňka, což byla základní jednotka zásobníku, kde konstrukci tvoří jedna komora a výsypka. Dle jejich proporcí dělila zásobníky na:

- bunkr konstrukce u níž je  $h \leq 1,5\sqrt{A}$ ,



- silo konstrukce u níž je  $h > 1,5\sqrt{A}$ , resp. u kruhové buňky:  $h > 1,33d$  a u čtvercové buňky  $h > 1,5d$

kde:

$A \text{ [m}^2\text{]}$	plocha vnitřního průřezu buňky
$d \text{ [m]}$	průměr buňky
$h \text{ [m]}$	výška komory buňky

Dnes platná norma ČSN EN 1991-4 [7] rozlišuje zásobníky podle poměru  $\frac{h_c}{d_c}$ , který je označován jako štíhlost, kde  $h_c$  je výška části zásobníku se svislými stěnami od přechodu k ekvivalentnímu povrchu a  $d_c$  je charakteristický rozměr zásobníku. Přechodem norma rozumí průsečík výsypky a svislých stěn a ekvivalentním povrchem myšlený rozměr, který má pro danou látku stejný objem jako skutečný povrch. Rozlišuje je na:

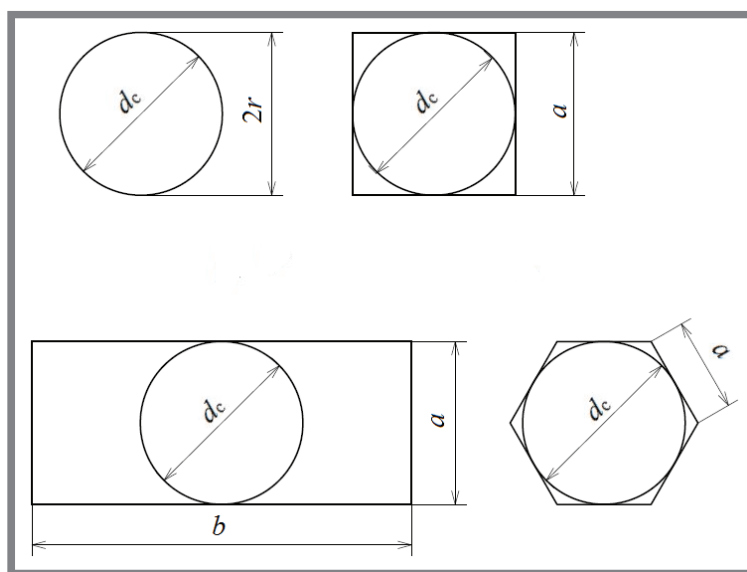
- Štíhlý zásobník zásobník u něhož  $\frac{h_c}{d_c} \geq 2$
- Středně štíhlý zásobník zásobník u něhož  $1 < \frac{h_c}{d_c} < 2$
- Nízký zásobník zásobník u něhož  $0,4 < \frac{h_c}{d_c} < 1$

Pokud  $\frac{h_c}{d_c} \leq 0,4$  jedná se o nízký zásobník, pokud je opatřen výsypkou, nebo o uzavřený zásobník, pokud má ploché dno.

Podle tvaru průřezu je dělen na:

- Kruhový zásobník zásobník s kruhovým vodorovným průřezem
- Nekruhový zásobník zásobník jehož vodorovný řez má jiný než kruhový tvar

Norma také udává povolené tvary zásobníkových průřezů viz obr. 1.1



Obr. 1.1 Povolené tvary průřezů [7]

Kde:

$d_c$ [m]	charakteristický rozměr zásobníku
$a$ [m]	délka hrany zásobníku
$b$ [m]	délka delší hrany zásobníku s obdélníkovým průřezem
$r$ [m]	poloměr kruhového zásobníku

---

### 1.3 Situace na trhu

Skladování práškových kovů nepodléhá žádné speciální normě, nebo bezpečnostním ustanovením. Proto se na trhu neobjevuje žádná specializovaná firma, která by se zabývala pouze výrobou nádob a zařízení pro skladování práškových kovů.

V práškové metalurgii se potýkají s uskladněním práškových kovů také. Zde jsou ale zásobníky a jiné nádoby na jejich uchovávání součástí výrobních linek, ať už při výrobě prášku, nebo při samotné výrobě součástí.

Při hledání kontejneru na práškové kovy se tak musí zákazník spokojit s produkty, které nejsou primárně určeny pro práškové kovy, ale jsou určeny pro skladování jiných sypkých látek. V tomto ohledu má poté celkem široký výběr materiálů, tvarů, velikostí a použití skladovacích kontejnerů a nádob, které mohou uspokojit jeho požadavky na kvalitu skladování, cenu nebo rozměry.

---

#### 1.3.1 Plastové nádoby

Plastové nádoby jsou levnou a vcelku vhodnou možností, jak přepravovat a skladovat práškové kovy. Různí výrobci nabízejí široký sortiment plastových sudů a nádob všech možných tvarů, velikostí, barev i použití.



Obr. 1.2 Plastové sudy Curtec s širokým hrdlem série 6900 [8]



Obr. 1.3 Sud na nebezpečné látky [9]

### 1.3.2 Kovové nádoby

1.3.2

---

Mezi kovovými nádobami je široký výběr. Na skladování sypkých materiálů existují kontejnery otevřené, které se nedají použít ke skladování práškových kovů. Nutností jsou uzavřené kontejnery, které lze hermeticky uzavřít. Pro skladování v řádech tun jsou k dispozici sila.



Obr. 1.4 Nerezové kontejnery firmy NIRO-INOX s příívodem inertního plynu [10]



Obr. 1.5 Speciální nerezové nádrže Schäffer [11]

---

### 1.3.3 Celé zařízení

Existují také firmy, které jsou schopné dodat nejen skladovací zařízení, ale celou infrastrukturu, včetně zařízení k nakládání, míchání, vážení atd.



Obr. 1.6 Kompletní zařízení Flexicon [12]



## 2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

---

**2**

Z komerčně nabízených kontejnerů, žádný neodpovídá požadavkům SLM laboratoře. Z rešerše vyplývají tyto základní problémy a nedostatky.

### 2.1 Nevhodnost nabízených kontejnerů

---

**2.1**

Jedním z hlavních požadavků laboratoře je možnost skladovat práškový hliník v inertní atmosféře. Toto umožňuje pouze jeden z nalezených výrobců skladovacích kontejnerů.

Dalším problémem je absence jakéhokoliv způsobu určování stavu zásobníku. Není zde žádná možnost, jak zjistit kolik materiálu je uvnitř ještě uskladněno.

Samozřejmým nedostatkem je nemožnost připojení standardních ventilů, používaných u pracovních nádob SLM tiskárny. Ty jsou nutné pro snadné plnění a vyprazdňování zásobníku a zároveň jsou nezbytné pro udržení inertní atmosféry.

Není nabízen žádný kontejner, který by byl lehce transportovatelný a zároveň s dostatečným objemem. Malé plastové nádoby sice jsou lehce přenosné, ale nepojmou tolik materiálu jako větší zásobník např. z nerezové oceli. Takový je zase konstruován pouze ve statickém provedení. Z důvodu efektivního skladování a využití místa v laboratoři, je nutné, aby byl zásobník jak snadno přemístitelný, tak aby pojal dostatečně velké množství hliníkového prášku.

### 2.2 Základní předpoklady a zhodnocení problematiky provozu

---

**2.2**

#### 2.2.1 Rozměry a tvar

---

**2.2.1**

Základním parametrem je velikost zásobníku. Musí být dostatečně velký na to, aby se do něj vešlo alespoň 100 kg práškového hliníku. Toto množství stanoví konečné rozměry. Do úvahy se budou muset zahrnout specifické vlastnosti partikulárních látek, jako je tvorba sypného kužele nebo segregace materiálu podle velikosti částic.

Důležitým tvarovým prvkem každého zásobníku je výsypka, která má pro daný skladovaný materiál určitý optimální úhel. Ten závisí na materiálových charakteristikách skladované látky, především na úhlu vnitřního tření [13]

#### 2.2.2 Nosnost a pevnostní výpočty

---

**2.2.2**

Protože 3D SLM tiskárna nevyužívá pouze hliníkový prášek, ale taky prášek titanový, popřípadě nerezový [14], musí se počítat s tím, že zásobník bude zatížen i tímto obsahem. V tomto ohledu se musí počítat s omylností obsluhy a s nejhorším možným scénářem. Hliník má hustotu  $2700 \text{ kg/m}^3$ , nerezová ocel přibližně  $8000 \text{ kg/m}^3$ . Pokud bude celý vnitřní objem naplněn nerezovým práškem, bude hmotnost zátěže přibližně třikrát větší, než s jakou by se počítalo pouze při použití hliníku

### 2.2.3 Inertní atmosféra

Inertní atmosféra bude do zásobníku přiváděna ze současného zařízení tiskárny, které plní pracovní komoru dusíkem. Ten bude vháněn dovnitř přes redukční ventil, aby nedošlo ke zvýšení tlaku v zásobníku. Protože je ale nežádoucí, vytvořit uvnitř v zásobníku atmosféru stlačeného  $N_2$  a vzduchu, musí zde být namontován druhý ventil, který bude odvádět vzduch zevnitř nádoby a povede jej do snímače. Ten je opět integrován v zařízení 3D tiskárny. Funkcí snímače je zjišťování hladiny kyslíku v odváděné směsi. Když dosáhne přijatelné hodnoty, bude plnění nádoby inertním plynem zastaveno.

Vzniká zde ale otázka umístění ventilů vůči sobě. Hustota dusíku při  $18^\circ\text{C}$  je  $1,25\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  a hustota vzduchu je  $1,29\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  [15]. Jasně z toho vyplývá, že v zásobníku se bude dusík, jakožto plyn s nižší hustotou, držet nahoře, zatímco vzduch dole. Pokud budou oba ventily ve stejné výšce, může se stát, že dusík, který je do zásobníku přiváděn, bude ihned odebírán druhým ventilem. Snímač bude hlásit nulovou hladinu kyslíku, i když jeho obsah bude stále značný.

### 2.2.4 Způsob plnění a vyprazdňování

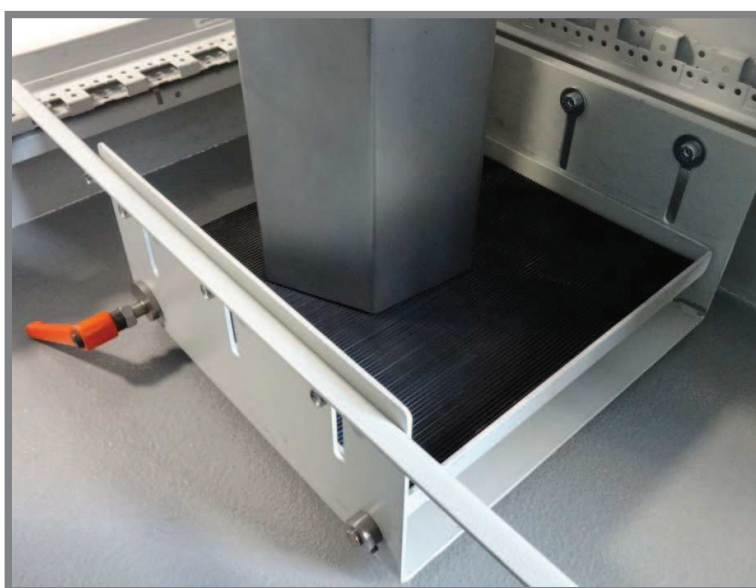
Při plnění zásobníku mohou obecně nastat dvě situace. Buď bude materiál nasypáván poprvé a tudíž z přepravky od výrobce, nebo bude již jednou použit a bude se nasy-pávat ze standardního kontejneru. To znamená, že konstrukce bude muset umožňovat efektivní plnění oběma způsoby. V prvním případě je vhodné mít k dispozici zásob-ník s odnímatelným víkem, aby se dal kovový prášek přímo přesypat. Tato operace



Obr. 2.1 Standardní ventil používaný na transportních nádobách

bude muset probíhat velice opatrně ale zároveň rychle, aby došlo k co nejmenšímu vystavení prášku vlivům okolního vzduchu, ale zároveň se nesmí prášek rozvířit. Pro druhý případ bude muset být zásobník vybaven ventilem, který je shodný s tím, který je používán u transportních kontejnerů tiskárny.

Je logické, že pokud se má materiál odebrat, musí se připojit kontejner zespod výsypky. Tzn. že pod zásobníkem musí být dostatečný manipulovací prostor pro jeho připojení. Zároveň zde musí být zařízení, které jej dostane do přesné polohy vůči ventilu na zásobníku. Hlavně ve vertikálním směru, neboť ventily musí na sebe dosedat přímo, aby se minimalizoval prostor mezi nimi. Ke kompenzaci axiálních posuvů ventilů je v zařízení tiskárny použito dvou způsobů. Jedním je zvedací plošina na vačkovém mechanismu, druhá je použití pružného spojovacího členu tam, kde je potřeba kompenzovat odchylky i v jiném směru.



Obr. 2.2 Zvedací dno



Obr. 2.3 Vačkový mechanismus



Obr. 2.4 Použití vlnovce

Vzniká zde ale otázka, jak zjistit, že už je transportní kontejner plný a je potřeba zavřít ventily. Takovéto zařízení obsahuje pouze speciální kontejner na titan a u ostatních nádob chybí. Zařízení tiskárny toto nijak neřeší, proto bude potřeba vymyslet nový způsob.

---

### 2.2.5 Měření obsahu

Stejně jako u malých kontejnerů, tak i u celého zásobníku je nutno vymyslet princip monitoringu uskladněného materiálu. V současné době se u stávajícího zařízení používá metoda poklepu, kdy lze sluchem zjistit, jestli je za stěnou materiál, či nikoliv. Toto ale není příliš efektivní způsob a ve větších rozměrech dosti špatně realizovatelný.

Ideální by tedy bylo najít jednoduchou metodu, která by umožnila rychle a efektivně zjistit množství prášku v zásobníku. Dalo by se to rozdělit na dva směry postupu. Přímý, kdy se bude zjišťovat přímo hladina a nepřímý, kdy se bude hladina materiálu dopočítávat na základě jiné naměřené veličiny.

---

### 2.2.6 Nosná konstrukce

Zásobník bude uchycen do příhradové konstrukce, se kterou bude rozebíratelně spojen. Je to hlavně z praktických důvodů, kdy bude celá sestava jednodušší na výrobu a také pro případné čištění zásobníku.

Její rozměry budou navrženy podle rozměrů zásobníku a podle nutného místa k plnění transportních nádob.



### 2.2.7 Mobilita a úspora místa

2.2.7

---

Stávající systém skladování je mimo jiné nevhodný také pro svou prostorovou náročnost. Jeden větší zásobník bude zabírat daleko méně prostoru, než dvacet malých plastových nádob.

Manipulace se zásobníkem bude ulehčena instalací kolečka do každého rohu. Minimálně dvě z nich by měla být otočná a opatřena brzdou.

Z pohledu dynamiky a statiky se musí brát zřetel také na to, že celá konstrukce bude mít značnou výšku a převážná hmotnost a tudíž i těžiště budou dosti vysoko. Proto se musí celá konstrukce zkontrolovat na možnost překlopení při pohybu, nebo i v klidu při špatné manipulaci.

## 2.3 Cíle práce

2.3

---

Z analýzy vyplývá několik konstrukčních problémů, na jejichž řešení se tato práce dále zaměří. Mezi ty hlavní patří způsob přívodu inertní atmosféry, způsob zjišťování množství uskladněného materiálu a připojení transportních kontejnerů. Dále se tato práce zaměří na návrh ideálního tvaru zásobníku, jeho rozměrů a pevnostní analýzu při provozu. Poté bude navržena nosná konstrukce, její rozměry a bude proveden rozbor její stability.

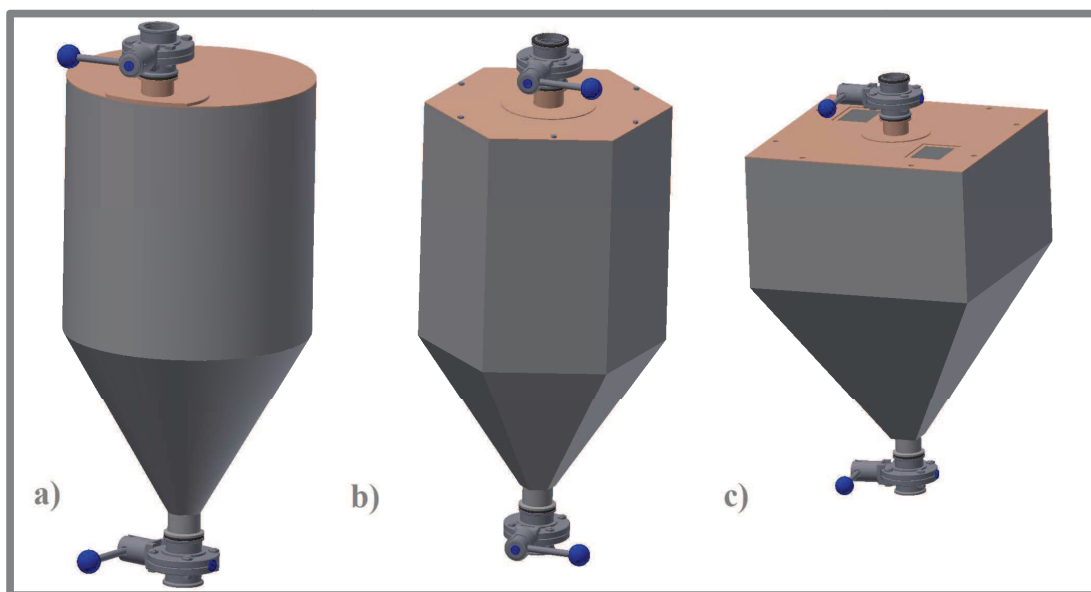
## 3 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ

### 3.1 Zásobník

Prvním důležitým krokem je zvolení nejvhodnějšího tvaru zásobníku. Nejjednodušší tvar průřezu zásobníku je kruh. Materiál v takovémto zásobníku je ideálně rozmístěn a pokud má výsypka správný tvar a výtokový otvor má dostatečnou velikost, tak by nemělo docházet k jakémukoliv problému při plnění nebo vyprazdňování zásobníku. Jistou nevýhodou může být dražší výroba a složitější způsob uchycení.

Na druhou stranu nejjednodušší na výrobu je zásobník s čtvercovým půdorysem. Jeho výhodou je efektivní využití prostoru v laboratoři, kdy se dá bez problémů přistavit těsně ke zdi, nebo do rohu. Nevýhodou je nebezpečí usazování materiálu v rozích nádoby. Tomu lze v malém měřítku zabránit občasným poklepem při vyprazdňování.

Tvarovým kompromisem může být šestihranný půdorys, který je také využíván na nádobách k tiskárně. Kombinuje prostorovou efektivitu a snadnější výrobu čtvercového kontejneru a lepší tok materiálu kruhové varianty [13].



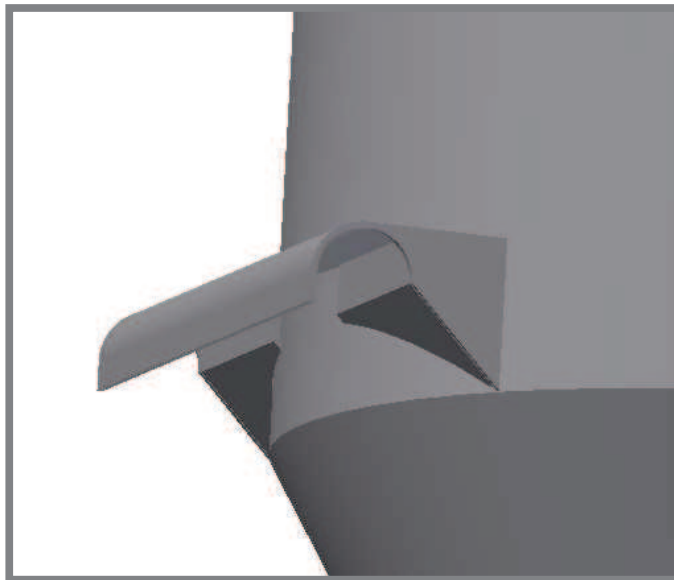
Obr. 3.1 Návrhy tvarů zásobníku

Na obrázku 3.1a je možné si všimnout excentrického umístění horního ventilu. Důvodem pro tuto variantu byla snaha o snížení ohybového momentu, který působí na víko.

#### 3.1.1 Přichycení k rámu

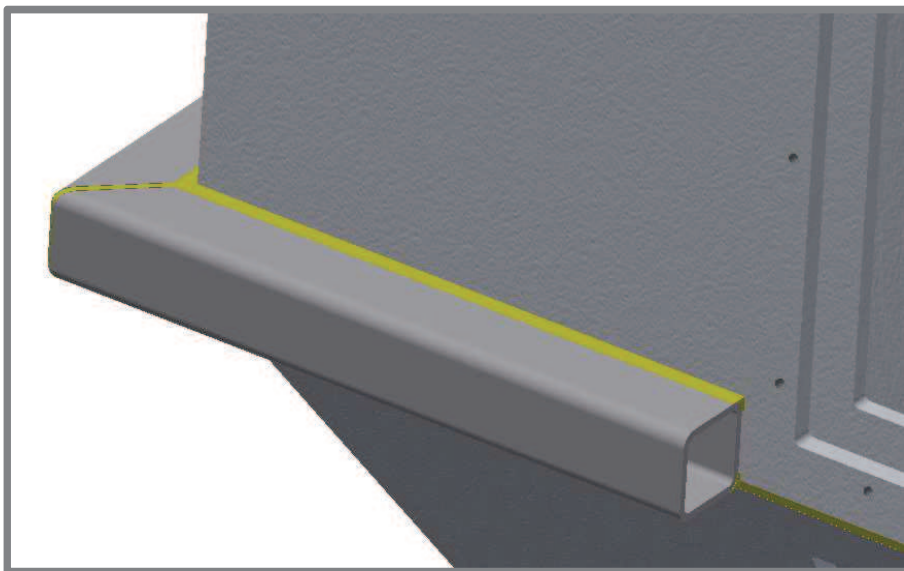
Zásobník musí být přichycen k nosnému rámu rozebíratelným spojem, tj. buď přišroubován, nebo pouze gravitačně usazen v tvarovém prvku.

Pro montáž k rámu lze vymyslet řadu různě tuhých a funkčních konstrukcí. Jedna z nich je znázorněna na obrázku 3.2. Nevýhodou je složitost výroby a nároky na přesnost



**Obr. 3.2** Ucho pro montáž na rám

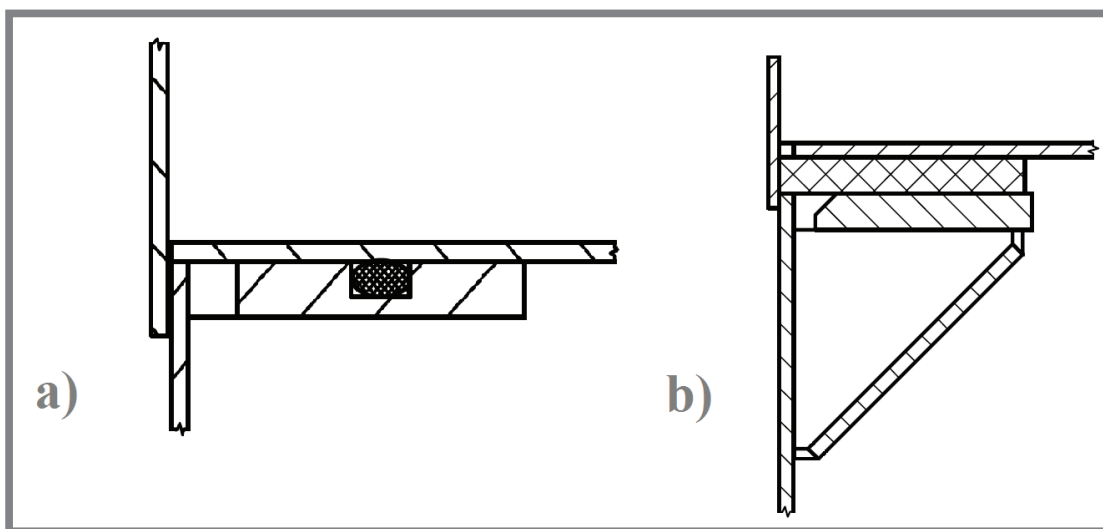
Jinou variantou je přivaření věnce z plechu nebo profilů po obvodu nádoby. Ten je jednak spojovacím prvkem mezi kontejnerem a rámem a jednak vyztuží přechodovou oblast mezi svislými stěnami a výsypkou.



**Obr. 3.3** Obvodový věnec z jechlů

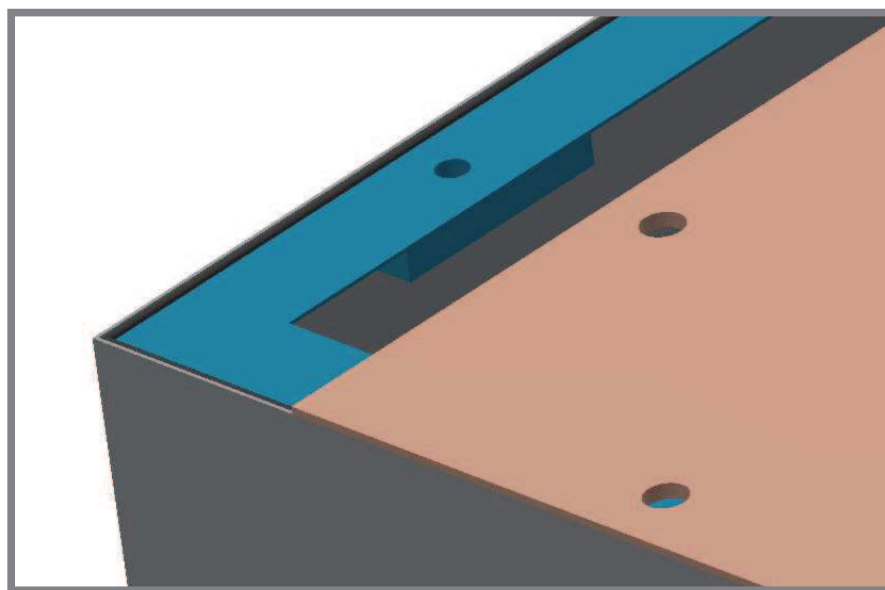
### 3.1.2 Utěsnění víka

Aby byl zásobník hermeticky uzavíratelný, musí být dobře utěsněn. Proto je nutné umístit mezi víko a dosedací plochu těsnění. To může být různého tvaru nebo materiálu. Nejvhodnější materiál pro tuto aplikaci je klasické pryžové těsnění ve tvaru kruhového pásu (viz obr 3.4a), popřípadě ploché těsnění (viz obr 3.4b). Kruhové těsnění je nevýhodné, protože je nutné frézovat drážku specifických rozměrů.



Obr. 3.4 Varianty umístění těsnění mezi víkem a jeho dosedací plochou

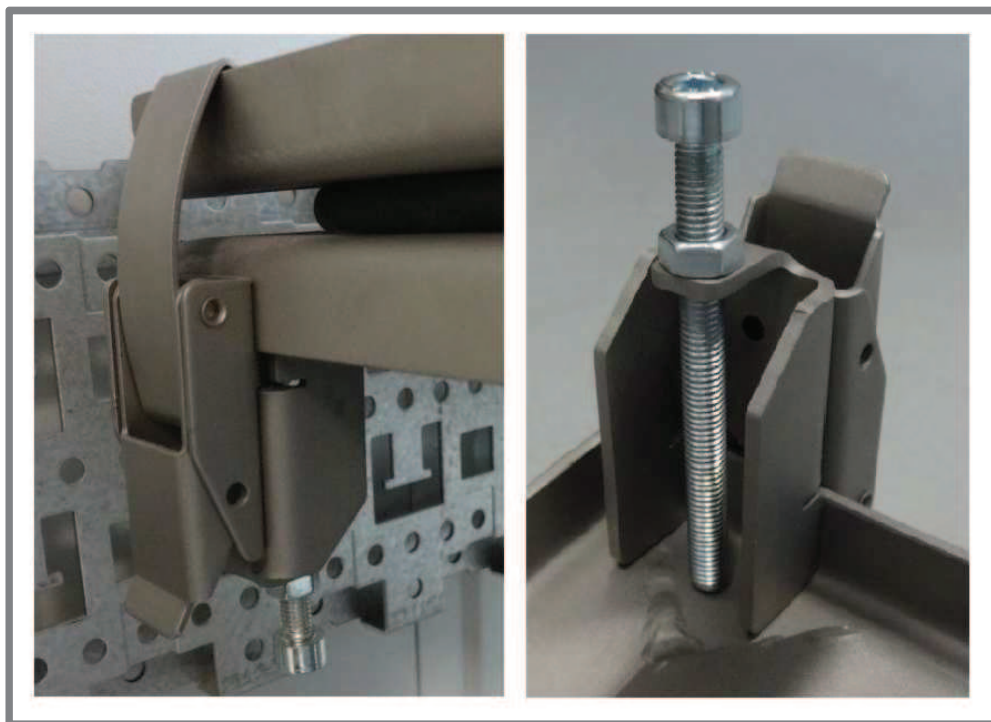
Aby bylo těsnění funkční, musí být dostatečně stlačeno. Tohoto lze docílit spojením víka s nádobou pomocí šroubového spoje nebo pomocí stahovací spony.



Obr. 3.5 Díry pro šrouby ve víku i nádobě

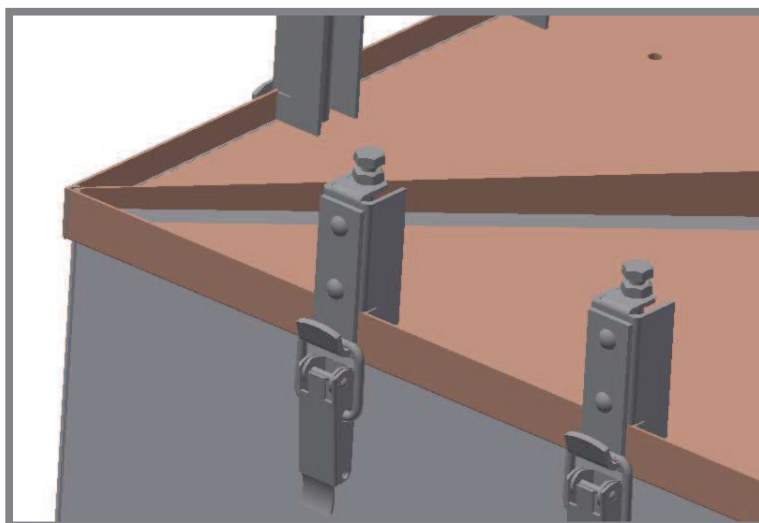
Jak lze vidět na obrázku 3.5, šroubový spoj vyžaduje přivaření dalšího dílu, ve kterém by byl závit. Díra pro šrouby totiž nesmí být průchozí. Docházelo by tudy k úniku inertní atmosféry.

Stahovací spony lze nalézt také na nádobách patřících k tiskárně. Existuje zde i systém pro zajištění potřebného předpětí při použití nenastavitelných spon.



Obr. 3.6 Součást pro vyvození předpětí použitá na přesívacím zařízení

Tento způsob se nedá z tvarových důvodů použít na zásobníku. V úvahu připadá jeho obměna, kdy je spona vybavena protikusem ve tvaru háčku. Ten se posléze dá připojit k již zmíněnému napínacímu prvku (viz obr. 3.7).



Obr. 3.7 Modifikace napínacího prvku

---

## 3.2 Přístupy ke zjišťování obsahu zásobníku

Nejjednodušší metoda spočívá v poklepu na zásobník. Pomocí sluchu pak lze posoudit, zda je za stěnou materiál, či nikoliv. Ta je ale velice orientační a vhodná spíše pro malé nádoby.

Druhá metoda je stejně jednoduchá a spočívá ve vizuální kontrole vnitřku kontejneru. Zde se dají vytvořit dvě různé koncepce. Dá se také využít vážení zásobníku jako nepřímý postup při zjišťování hladiny. Poslední zde uvedená metoda bude spočívat v použití kapacitních hladinoměřů.

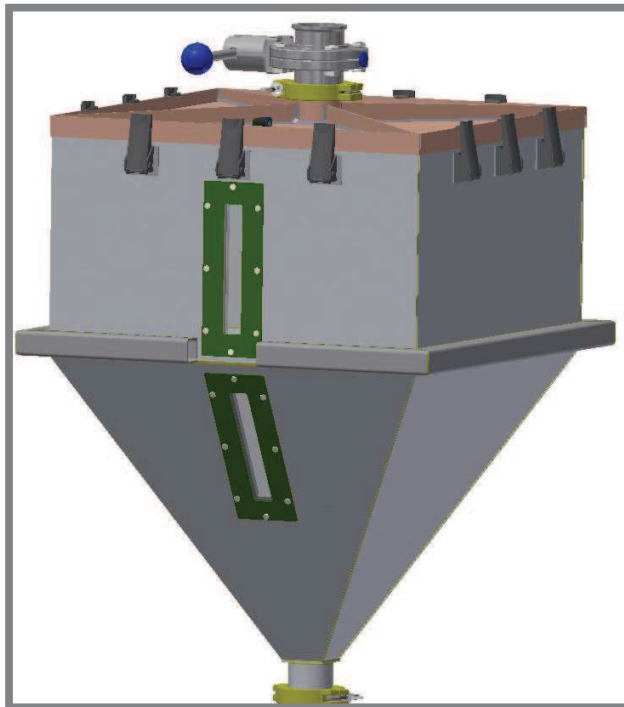
Samozřejmě to nejsou jediné metody, které by umožnily zjistit stav zásobníku. Lze montovat také ultrazvukové senzory, optické měřiče hloubky aj. Ty ale nebudou zmíněny v této práci.

---

### 3.2.1 Vizuální měření hladiny pomocí průhledítka

Tento způsob spočívá ve vložení plexisklového nebo skleněného průhledítka do stěny nádoby. To by muselo být pevně spojeno se stěnami zásobníku a utěsněno, aby udrželo hermetičnost celé konstrukce. Dalším problémem, který vzniká při použití průhledítka je narušení celistvosti kontejneru a tím pádem jeho vliv na pevnostní výpočty ve formě vrubu.

Dalším problémem, který by mohl nastat, je zanesení průhledítka práškem a tím pádem zkreslení celého pozorování.



Obr. 3.8 Použití průhledítka

### 3.2.2 Vizuální měření hladiny pomocí okénka

3.2.2

---

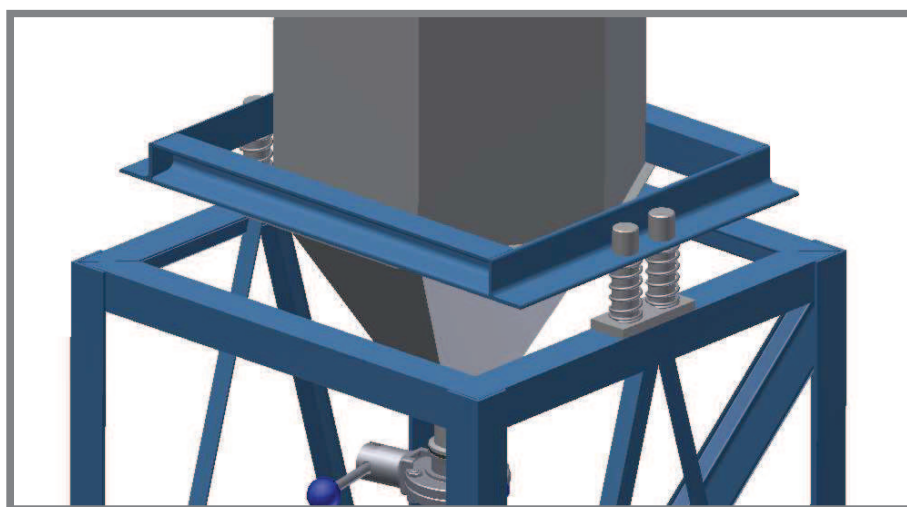
Problém s narušením stěny nádoby a případné přilnutí prášku na plexisklo by vyřešilo umístění otvoru do víka zásobníku. Instalace by musela samozřejmě splňovat podmínku hermetičnosti, ale odpadl by problém s namáháním plexiskla v tahu. Vzniká zde ale problém s nedostatkem světla, který by musel být řešen dodatečnou instalací zdroje osvětlení, popřípadě by musela být obsluha vybavena kapesní svítilnou.

### 3.2.3 Měření hladiny pomocí měření hmotnosti

3.2.3

---

Tato metoda je složitější než předchozí dvě a to z toho důvodu, že se musí zajistit dostatečně volné uložení zásobníku v rámu, aby bylo možné jej zvážit. Existují minimálně dva přístupy měření hmotnosti použitelné v této aplikaci. První je čistě mechanický a funguje na principu pružinového uložení. Tato metoda je sice relativně jednoduchá, ale vyžaduje vytvoření stupnice a její ocejchování. Každá stupnice by byla unikátní a použitelná pouze se stejnými pružinami a stejným materiálem uvnitř. Pružiny by se navíc musely pro každou aplikaci jednotlivě dimenzovat, protože musí zajistit dostatečný rozsah pohybu a citlivost.



Obr. 3.9 Návrh uložení na pružinách

Druhá metoda počítá s použitím tenzometrů. K přesnému měření a zajištění stability je zapotřebí dvou přístrojů. Toto řešení je univerzální pro jakýkoliv materiál, pokud mají tenzometry dostatečný rozsah. Je ovšem nutné připojit speciální elektronickou jednotku, která zpracovává signál a podává informace na výstupní displej. Toto řešení je náročné z hlediska tuhosti rámu a ceny.[16]

### 3.2.4 Měření hladiny pomocí kapacitních hladinoměrů

3.2.4

---

Kapacitní hladinoměry pracují na principu měření kapacity v závislosti na ponoření elektrody. Dají se využít jak pro kapalné, tak sypké látky. Vyžadují zásah do kon-



strukce a přesné umístění v ní. Stejně jako u využití tenzometrů je potřeba speciální příslušenství k vyhodnocení signálu z elektrody. Dají se pořídit buď jako kontinuální měřiče hladiny nebo jako limitní, které budou měřit pouze maximum, minimum azvolené body. Není problém pořídit i snímače do potenciálně výbušných prostředí. Jejich hlavní nevýhodou je pořizovací cena a složitější instalace [17].

---

### 3.3 Přívod inertní atmosféry

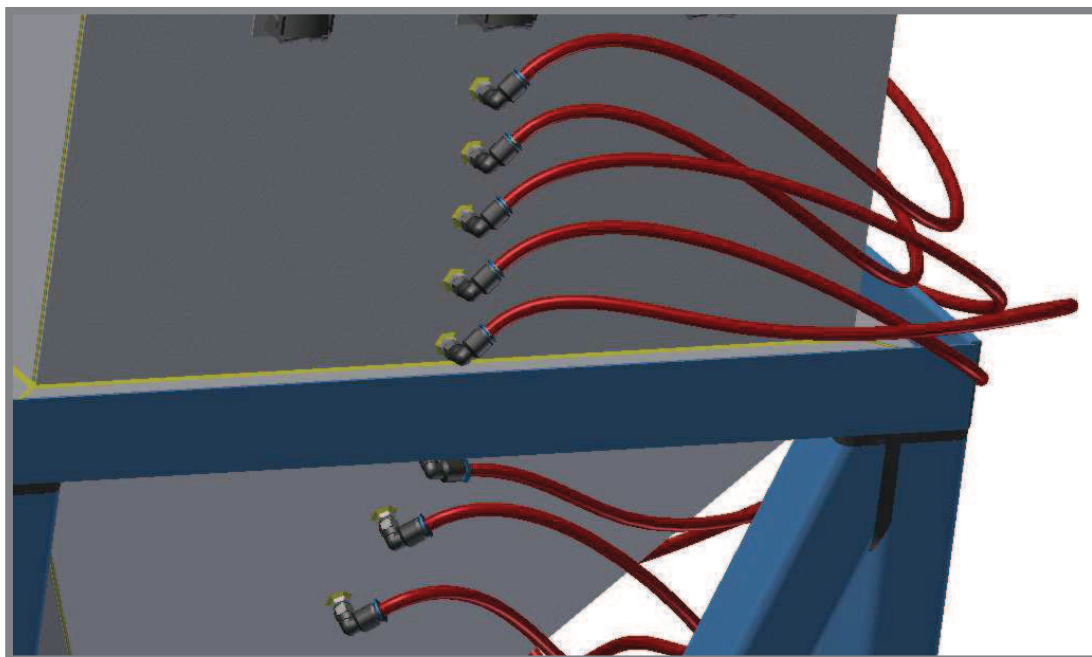
Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.2.3, tak dusík je lehčí než vzduch. To značně ovlivňuje možnosti plnění zásobníku. Jakmile je dusík přiveden dovnitř, nachází se vždy nad vzduchem nebo se tam snaží dostat. Z toho vyplývají dodatečné požadavky na rozmístění ventilů.

Pokud je dusík přiváděn z nižšího místa, než je odváděn vzduch, tak jej teoreticky může při své cestě nahoru vytlačovat. Druhou variantou je promísení plynů a vypuštění dusíku ven.

Pokud se ale dusík přivede výš, než se odvádí vzduch, tak už taková poloha zajistí vytlačení vzduchu dusíkem ven. S přívodním ventilem není problém. Ten lze umístit na víko.

Problém je vypouštěcí ventil. Ten musí být co nejnižší, ale zároveň nesmí být pod hladinou skladovaného materiálu, která se v čase mění, podle toho, kolik materiálu je momentálně potřeba. Montáž kontinuálního odváděcího systému je riziková z pohledu možného nasátí velkého množství metalického prášku a zajištění odvodu pouze vzduchu a nikoliv dusíku.

Jako nejjednodušší řešení se jeví montáž sady ventilů, která umožní otevřít ten nejnižší, který je k dispozici, tj. první nad hladinou skladovaného materiálu. Jednotlivé vývody se poté svádí do jednoho, který jde přes filtr pevných částic do snímače obsahu kyslíku.



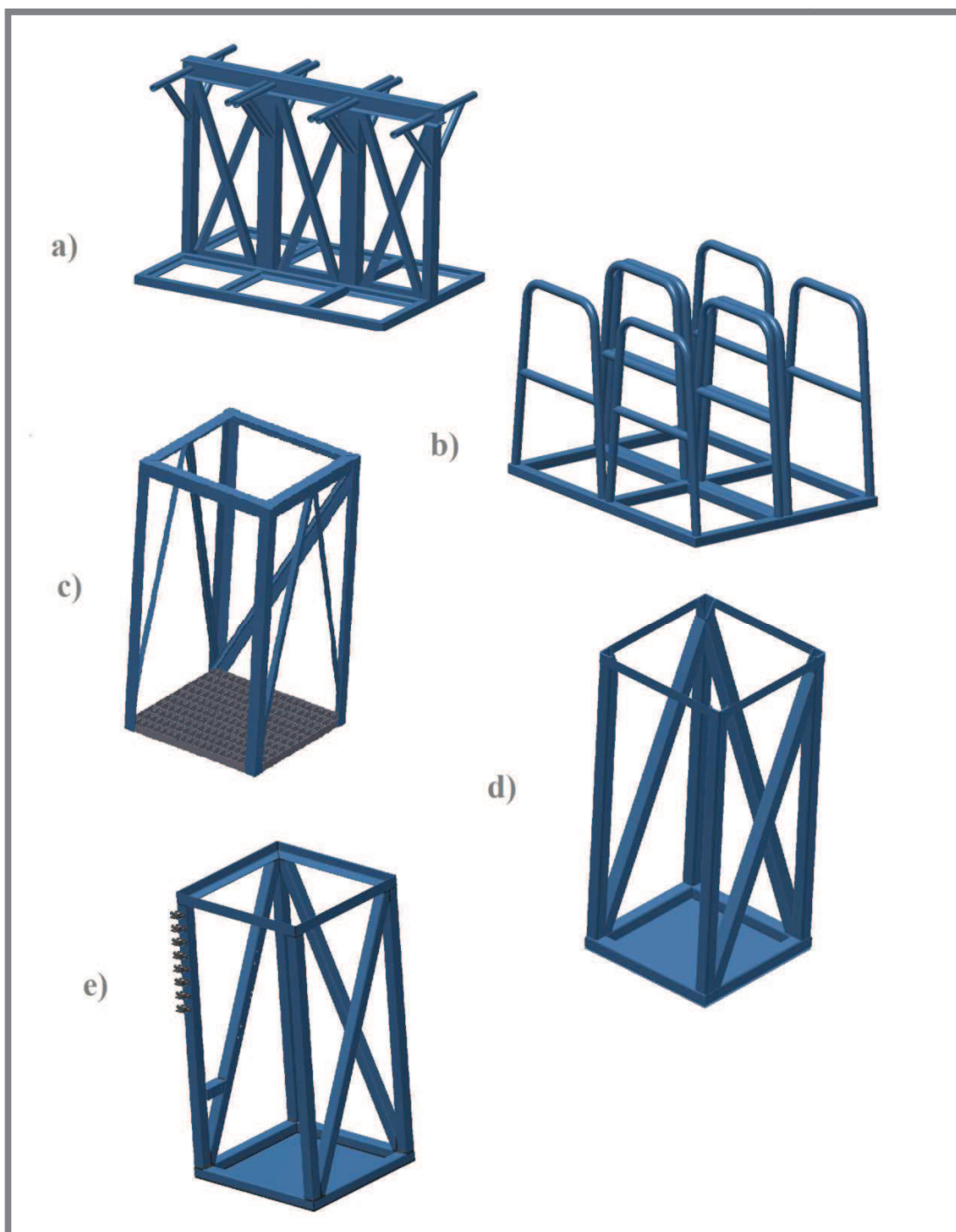
Obr. 3.10 Sada odváděcích hadic na zadní stěně zásobníku



### 3.4 Rám

3.4

Během vývoje optimální rámové konstrukce bylo vytvořeno a zavrhnuto několik variant.



Obr. 3.11 Varianty rámových konstrukcí

### 3.4.1 Varianty rámu

V prvních koncepcích byla rámová konstrukce společná pro několik zásobníků navedenou. (viz 3.11a a 3.11b) Výhodou je jednorázová výroba a zdánlivá kompaktnost konstrukce v tom smyslu, že jsou všechny zásobníky u sebe. Nevýhodou je celková velikost takového rámu a špatná manipulace s ním.

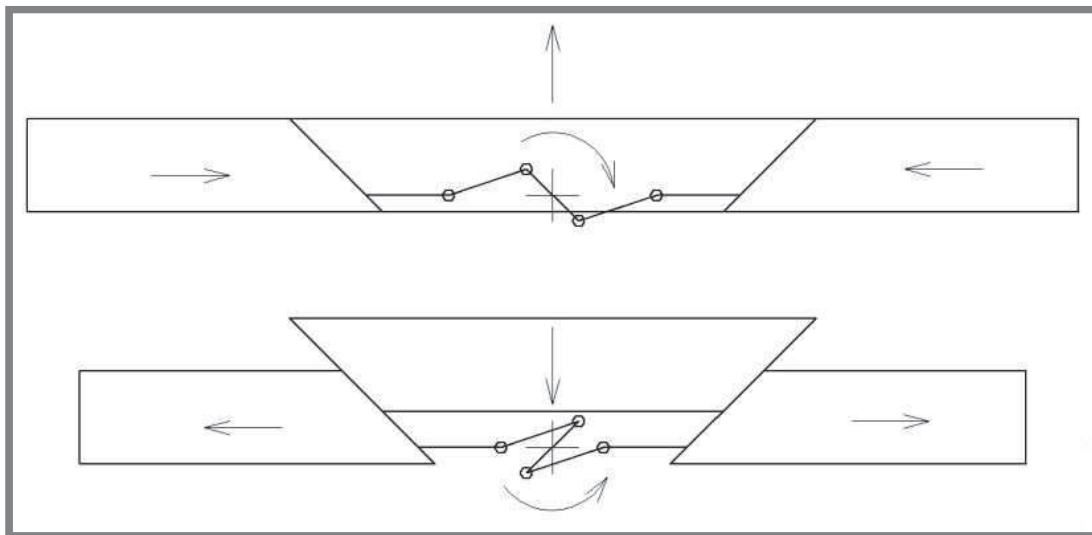
Proto bylo od vícenásobných konstrukcí ustoupeno a přešlo se ke konceptu jednoho zásobníku se samostatným nosným rámem.

První varianta měla dno z roštu (viz 3.11c), který je tuhý a unese velké zatížení. Proto je vhodný jako základ pro nosnou konstrukci. Nevýhodou této konstrukce je potenciální situace, kdy se prášek při špatné manipulaci vysype. Pokud je dno tvořeno roštem, tak prášek propadne na podlahu a je nenávratně znehodnocen. Pro takovéto havarijní situace je výhodnější plné dno (viz 3.11d a 3.11e).

### 3.4.2 Spojení nádob

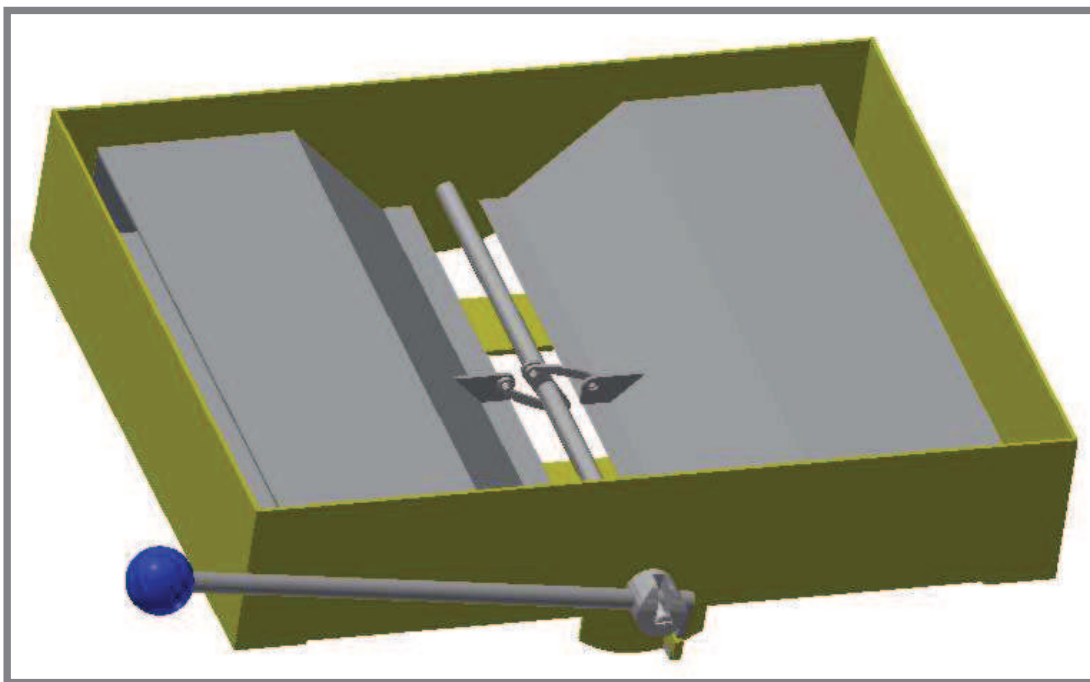
Dále je potřeba vyřešit spojení transportního kontejneru a zásobníku. Prvotním pokusem bylo vylepšení stávajícího zvedacího dna (viz obr. 2.2 a 2.3) a připojení nádoby k pevnému ventilu na dně zásobníku.

Navrhované dno funguje na principu klikového mechanismu místo vačkového. Přes kliku je rotační pohyb ovládací páky převeden na přímočarý pohyb dvou proti sobě se pohybujících klínů, které nadzvedávají posuvné dno o cca 20 mm. To je dostatečný zdvih k pohodlné manipulaci s nádobou a jejímu bezpečnému připojení.



Obr. 3.12 Schéma posuvného dna

Tato konstrukce však je zbytečně složitá. Také její montáž je možná pouze na velké rámové konstrukce a vůbec neřeší problém určování množství přesypaného materiálu.



Obr. 3.13 Konstrukční řešení posuvného dna

Proto byl znovu otevřen koncept měření hmotnosti. Pokud se dá celý zásobník vážit a transportní kontejner je pružně spojen se zásobníkem, tak je možné odečíst přesypanou hmotnost přímo z poklesu hmotnosti materiálu v zásobníku. Tento způsob je ale znovu velice složitý a klade zvýšené nároky na obsluhu.

Proto se myšlenka omezila pouze na vážení samotného transportního kontejneru, při zachování pružného spojení nádob.

## 4 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

---

Zásobník je řešen jako svarek z plechu tloušťky 2 mm. Tato hodnota je volena z důvodu většího namáhání některých částí. Například víko je na svém okraji vystaveno působení lokálního ohybového momentu od stahovacích spon a je proto vhodné, volit větší tloušťku z důvodu spolehlivé konstrukce. Ta je následně použita pro celý zásobník, z důvodu úspory kupovaného materiálu. Takto navržený zásobník poté odolá i hrubému zacházení a případným havarijním situacím, kdy na něj mohou působit velké dynamické síly, se kterými zde není počítáno. Jelikož je tloušťka stěn řešena zjednodušeným návrhem, jsou zde uvedeny ověřovací výpočty pevnosti v kritických místech

Vyroběn bude z nerezové austenitické oceli 17 240 (X5CrNi18-10 dle EN). Nosná konstrukce je také svarek, ovšem z jeklů a profilů. Materiál je volen dle výrobce ocel 11 375 (S235JRH dle EN) [18].

### 4.1 Koncepce zásobníku

---

Zásobník má čtvercový průřez, z důvodu jednoduché výroby a snadného umístění do nosného rámu. Spojení je řešeno tvarovým stykem jeklu a L-profilu. Nádoba je držena na místě pouze tíhovou silou. To je pro danou aplikaci zcela postačující způsob. Zásobník je opatřen víkem, které má snížený okraj přes jeho hranu, což umožní jednodušší usazení a zajistí jeho správnou polohu při upínání. Mezi víko a zásobník je vloženo těsnění z pryžové fólie tloušťky 5 mm. Materiál fólie je SBR 65, který je vhodný pro všeobecné těsnicí použití bez zvláštních požadavků na chemickou odolnost a nejsou na něj kladeny zvláštní požadavky ohledně mechanického namáhání.

Potřebná přitlačná síla je na víku vyvozena použitím 12 nastavitelných stahovacích spon. Spony jsou zachyceny za okraj víka, proto není potřebná montáž dalších háčků nebo jiných protikusů.

Spony jsou na stěny nádoby přichyceny pomocí trhacích nerezových nýtů, vždy po dvou kusech na jednu sponu. Aby byla zaručena hermetičnost konstrukce, je prostor za sponami uzavřen přídatnými výztuhami, které zajistí udržení inertní atmosféry a zároveň dodají potřebnou tuhost horní části nádoby.

Monitoring stavu zásobníku zajišťuje trojice průzorů. Dva jsou ve stěnách zásobníku a jeden na víku. Třetí jmenovaný slouží také jako dodatečný přívod osvětlení dovnitř nádoby.

Průzory jsou z extrudovaného plexiskla tloušťky 2 mm. Spoj mezi plexisklem a stěnou zásobníku je znovu utěsněn pryžovou fólií. Přitlačnou sílu zajišťuje osm šroubů M3,5.

### 4.2 Rozměry zásobníku

---

Hlavní rozměry jsou dimenzovány na uskladnění 100 kg hliníkového prášku. Sypný úhel je odvozen od sklonu jehlanovité části transportních kontejnerů.

Zadané parametry:

- Úhel odklonu výsypky od svislé roviny (sypný úhel)  $\beta = 30^\circ$

- Hmotnost hliníkového prášku
- Hustota hliníku
- Vnitřní průměr hrdla na výtakového otvoru
- Vnější průměr hrdla na výtakovém otvoru

$$m_{Al} = 100 \text{ kg}$$

$$\rho_{Al} = 2,7 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$$

$$d_{vytin} = 40 \text{ mm}$$

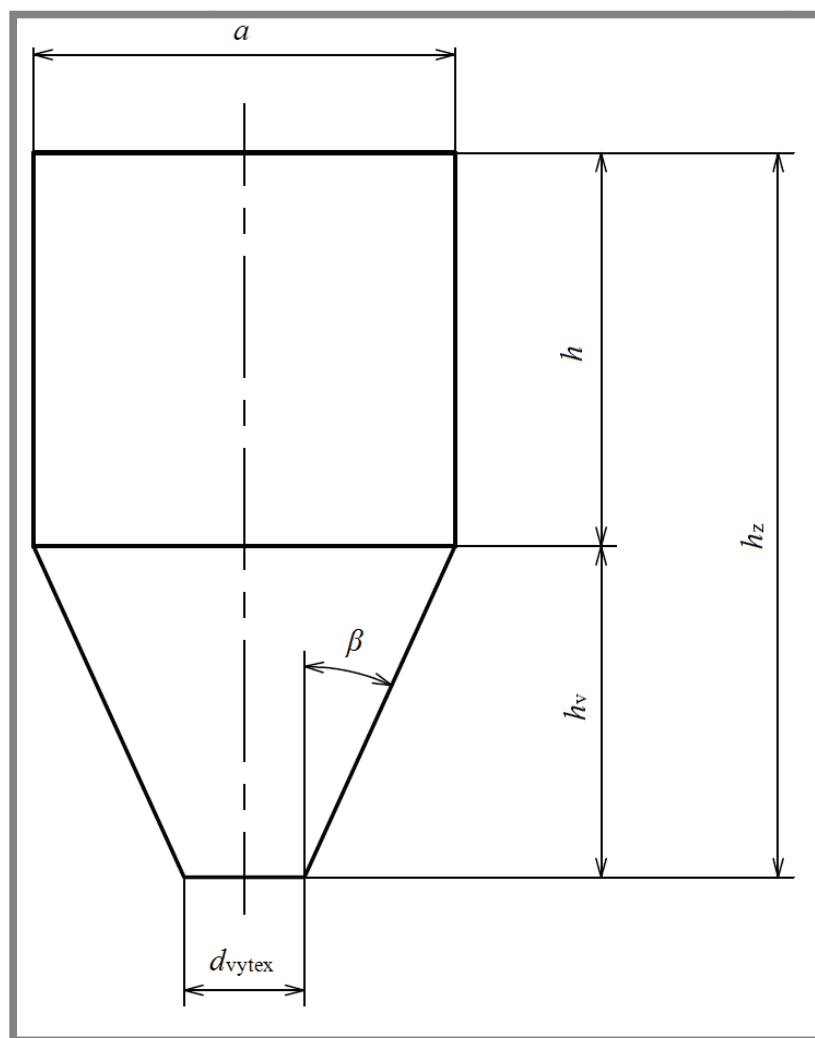
$$d_{vytex} = 44,4 \text{ mm}$$

Zvolené parametry:

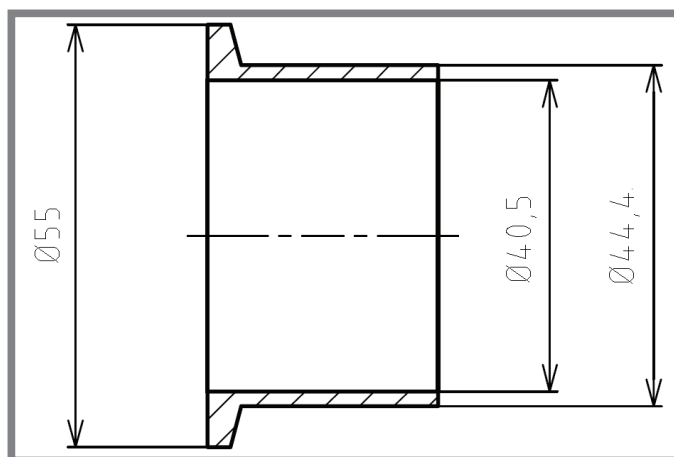
- Délka hrany zásobníku
- Tloušťka stěny zásobníku

$$a = 400 \text{ mm}$$

$$t = 2 \text{ mm}$$



Obr. 4.1 Rozměry zásobníku



Obr. 4.2 Koncovka nutná k připojení standardního ventilu

Vypočtené parametry:

- Výška výsypky  $h_v$ :

$$h_v = \frac{a - d_{vytex}}{2 \tan \beta} = \frac{0,40 \text{ mm} - 0,0444 \text{ mm}}{2 \tan 30^\circ} = 307,96 \text{ mm} \quad (4.1)$$

$$h_v \cong 308 \text{ mm}$$

- Objem výsypky  $V_v$ :

$$\begin{aligned} V_v &= \frac{1}{3} h_v (S + A + \sqrt{SA}) = \\ &= \frac{1}{3} h_v \left( (d_{vytex} - 2t)^2 + (a - 2t)^2 + \sqrt{(d_{vytex} - 2t)^2 (a - 2t)^2} \right) = \\ &= \frac{1}{3} 0,308 \text{ m} \left( (0,0404 \text{ m})^2 + (0,396 \text{ m})^2 + \sqrt{(0,0404 \text{ m})^2 (0,396 \text{ m})^2} \right) = \\ &= 0,0179 \text{ m}^3 \end{aligned} \quad (4.2)$$

Kde:

$A [\text{m}^2]$   
 $S [\text{m}^2]$

plocha vnitřního průřezu buňky  
 plocha vnitřního průřezu výsypky při jejím dně

- Celkový objem hliníku  $V_{Al}$ :

$$V_{Al} = \frac{m_{Al}}{\rho_{Al}} = \frac{100 \text{ kg}}{2700 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}} = 0,037 \text{ m}^3 \quad (4.3)$$

- Objem sypného kužele

Nejdříve je nutné spočítat ekvivalentní průměr kruhového zásobníku  $d_{ekv}$  se stejnou plochou jako má zvolený čtvercový průřez:

$$d_{ekv} = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4(396 \text{ mm})^2}{\pi}} = 446,839 \text{ mm} \quad (4.4)$$

Dle [13] lze pak vypočítat výšku myšlenkového válce  $h_{ekv}$ , jehož objem je stejný jako objem sypného kužele:

$$h_{ekv} = \frac{d_{ekv}}{6} \tan \varphi = \frac{446,839 \text{ mm}}{6} \tan 30^\circ = 42,997 \text{ mm} \quad (4.5)$$

$$h_{ekv} \cong 43 \text{ mm}$$

Kde:

$\varphi [^\circ]$                       úhel vnitřního tření (pro technická řešení lze dle [13] za úhel vnitřního tření s dostatečnou přesností dosadit sypný úhel  $\beta$ )

Objem sypného kužele  $V_{sk}$  se následně spočítá jako objem tohoto válce o výšce  $h_{ekv}$ :

$$V_{sk} = h_{ekv} S = 0,043 \text{ m} \cdot (0,396 \text{ m})^2 = 0,00674 \text{ m}^3 \quad (4.6)$$

- Objem hliníku, který bude v rovné části zásobníku  $V_{rov}$  (bez objemu sypného kužele)

$$V_{rov} = V_{Al} - V_v - V_{sk} = 0,037 \text{ m}^3 - 0,0179 \text{ m}^3 - 0,00674 \text{ m}^3 = 0,01235 \text{ m}^3 \quad (4.7)$$

- Výška zásobníku:

Nejdříve je nutné spočítat výšku sypného kužele  $h_{sk}$ :

$$h_{sk} = \frac{3V_{sk}}{S} = \frac{3 \cdot 0,00674 \text{ m}^3}{(0,396 \text{ m})^2} = 0,12899 \text{ m} \quad (4.8)$$

$$h_{sk} \cong 129 \text{ mm}$$

Poté se musí spočítat také výška materiálu v rovné části bez sypného kužele  $h_{rov}$ :

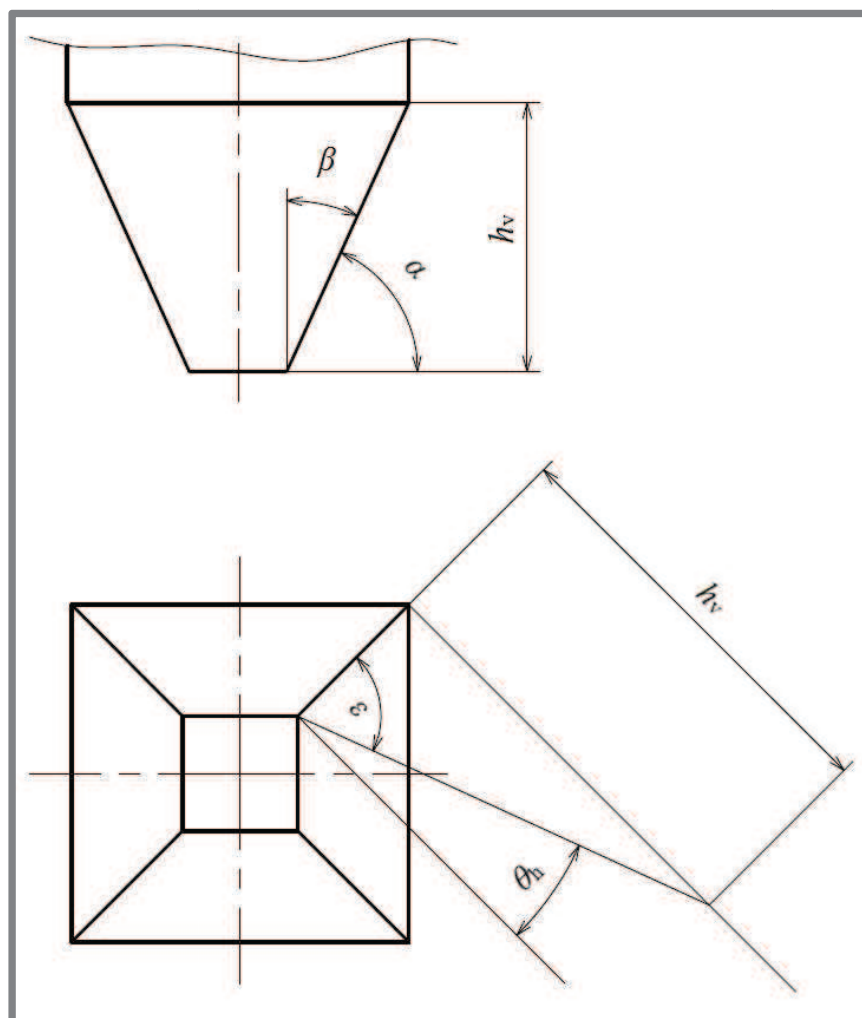
$$h_{rov} = \frac{V_{rov}}{S} = \frac{0,01235 \text{ m}^3}{(0,396 \text{ m})^2} = 0,07874 \text{ m} \quad (4.9)$$

$$h_{mat} \cong 79 \text{ mm}$$

Celková výška  $h_z$  je poté součet všech výšek dílčích a technologického a konstrukčního přírůstku  $h_p$ :

$$h_z = h_v + h_{rov} + h_{sk} + h_p = 308 \text{ mm} + 79 \text{ mm} + 129 \text{ mm} + 14 \text{ mm} = 530 \text{ mm} \quad (4.10)$$

Pro správné fungování jehlanové výsypky je nutné, aby její rozměry splňovaly určitá pravidla [13].



Obr. 4.3 Ověřovaná geometrie výsypky [13]

Pro úhel odklonu stěny výsypky od vodorovné roviny  $\alpha$  platí:

$$\alpha = (90^\circ - \beta) = \beta + (5 \div 10^\circ); \alpha > \varphi_w \quad (4.11)$$

$$\alpha = (90^\circ - 30^\circ) = 60^\circ$$

Kde:

$\varphi_w [^\circ]$

třecí úhel mezi materiálem a stěnou zásobníku

Podmínka není pro  $\beta = 30^\circ$  splněna. Tato rovnice ovšem říká, že úhel odklonu stěny od vodorovné roviny musí být větší než je úhel tření mezi stěnou a materiálem a to o  $5 \div 10^\circ$ . Hodnota  $\varphi_w$  však není k dispozici. Úhel  $30^\circ$  lze přesto použít, protože  $\alpha$  je větší o  $30^\circ$ , tzn. je na bezpečné straně. Dalším důvodem, proč lze tuto hodnotu akceptovat, jsou zkušenosti z provozu tiskárny, kde je tento úhel používán.

Pro úhel hrany výsypky  $\varepsilon$  platí analogicky:



$$\begin{aligned}\varepsilon &= (90^\circ - \theta_h) > \beta \\ \varepsilon &= (90^\circ - 39,25^\circ) = 50,75^\circ > 30^\circ\end{aligned}\quad (4.12)$$

Kde:

$\theta_h$  [°]                      doplňkový úhel

Tato podmínka je splněna.

### 4.3 Pevnostní výpočty - analytické

4.3

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.2.2, tak zásobník bude zatížen nejen hliníkem, ale v nejhorším případě i práškem z nerezové oceli. Proto je nutné dimenzovat pevnostní analýzu na toto zatížení.

Z hlediska dalších výpočtů je zapotřebí nejprve zjistit, zda se jedná o štíhlý či nízký zásobník, resp. silo nebo bunkr.

Nejdříve je nutné vypočítat výšku zásobníku od přechodu po ekvivalentní plochu  $h_c$ :

$$h_c = h_{rov} + h_{ekv} = 79 \text{ mm} + 43 \text{ mm} = 122 \text{ mm} \quad (4.13)$$

Charakteristický rozměr  $d_c$  je dle obr. 1.1 roven délce hrany  $a$ . Odtud:

$$d_c = 400 \text{ mm}$$

Poměr je tedy:

$$\frac{h_c}{d_c} = \frac{122 \text{ mm}}{400 \text{ mm}} = 0,305 \quad (4.14)$$

Protože  $0,305 < 0,4$  jedná se o nízký zásobník dle [7]. Podobným způsobem s využitím syného úhlu lze zjistit, že se jedná o bunkr dle [6].

Z toho vyplývá:

- 1) Zatížení vznikající při tření sytké látky o stěny zásobníku je zanedbatelné [13].
- 2) Vertikální tlak je tím pádem závislý pouze na hustotě, hloubce a tíhovém zrychlení. Lze jej tedy nahradit tlakem hydrostatickým [13].
- 3) Velikost horizontálního tlaku bude lineárně závislá pouze na hloubce [13].
- 4) Nelze použít výpočet minimální tloušťky stěny založený na bezmomentové skořepině
- 5) Výsypka bude nejvíce namáhané místo zásobníku, potažmo svar mezi výsypkou a svislými stěnami

Maximální vertikální tlak ve svislé části výsypky  $p_{vmax}$ :

$$\begin{aligned}p_{vmax} &= h\rho_{ner}g = 0,222 \text{ m} \cdot 8000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} = \\ &= 17422,56 \text{ Pa}\end{aligned}\quad (4.15)$$

Kde:

$g \text{ [m}\cdot\text{s}^2]$	tíhové zrychlení
$\rho_{\text{ner}} \text{ [kg}\cdot\text{m}^3]$	hustota nerezové oceli

Maximální horizontální tlak  $p_{h\max}$ :

$$p_{h\max} = p_{v\max} k \quad (4.16)$$

Koeficient  $k$  je součinitel bočního napětí (součinitel aktivního tlaku) a lze jej vypočítat dle [13]:

$$k = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} = \frac{1 - \sin 30^\circ}{1 + \sin 30^\circ} = 0,3 \quad (4.17)$$

Odtud pak dle rovnice (4.16):

$$p_{h\max} = 17422,56 \cdot 0,3 = 5807,52 \text{ Pa}$$

Horizontální síla  $F_h$ , která působí na stěnu se dá stanovit jako součin středního horizontálního tlaku a obsahu plochy stěny [19].

$$p_{h\text{stred}} = \frac{p_{h\max}}{2} = \frac{5807,52 \text{ Pa}}{2} = 2903,76 \text{ Pa} \quad (4.18)$$

$$F_h = p_{h\text{stred}} \cdot S_{\text{stena}} = 2903,76 \text{ Pa} \cdot 0,222 \text{ m} \cdot 0,396 \text{ m} = 255,28 \text{ N} \quad (4.19)$$

Stěny zásobníku budou svařeny tupým svarem. Napětí v takovémto svaru se dle [20] spočítá jako podíl zátěžné síly a součinu délky svaru a účinné tloušťky.

$$\sigma_{ss} = \frac{F_h}{s_{ss} l_{ss}} = \frac{255,28 \text{ N}}{2 \text{ mm} \cdot 222 \text{ mm} \cdot 2} = 0,287 \text{ MPa} \quad (4.20)$$

Kde:

$l_{ss} \text{ [m]}$	délka stěnového svaru
$s_{ss} \text{ [m]}$	účinná tloušťka stěnového svaru

Toto napětí se poté porovná se sníženou mezí kluzu svařovaného kovu. Svar je namáhán na tah a ohyb, proto je dle [20] mez kluzu vynásobena korekčním součinitelem 0,7 (smykové namáhání). Porovnání pak vypadá následovně:

$$\begin{aligned} 0,7 R_{p0,2} &> \sigma_{ss} \\ 0,7 \cdot 186 \text{ MPa} &> 0,287 \text{ MPa} \\ 130,2 \text{ MPa} &> 0,287 \text{ MPa} \end{aligned} \quad (4.21)$$

Kde:

$R_{p0,2} \text{ [Pa]}$	smluvní mez kluzu [21]
-------------------------	------------------------

Svarový spoj je značně předimenzován. Při této kontrole nebyl brán v úvahu vliv svaru jako koncentrátoru napětí. Vzhledem k řádovému rozdílu napětí, lze tento faktor zanedbat.

Jak již bylo zmíněno výše, nejnebezpečnější místo z hlediska velikosti napětí, je svar v přechodu výsypky – svislá stěna. Jelikož je úhel mezi stěnami malý, lze tento svar počítat jako tupý svar a tedy analogicky jako svar stěnový. Zátěžná síla je zde síla tíhová celé náplně, tzn. celkový objem zásobníku zaplněný práškem z nerezové oceli. K této hmotnosti je přičtena hmotnost samotné výsypky, ventilu a vlnovce. Celková hmotnost je stanoven odhadem.

Celkový objem zásobníku  $V_{celk}$ :

$$V_{celk} = V_v + Sh = 0,0179 \text{ m}^3 + (0,396 \text{ m})^2 \cdot 0,222 \text{ m} = 0,0527 \text{ m}^3 \quad (4.22)$$

Hmotnost nerezového prášku  $m_{ner}$ :

$$m_{ner} = \rho_{ner} V_{celk} = 8000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 0,0527 \text{ m}^3 = 421,7 \text{ kg} \quad (4.23)$$

Celková odhadovaná hmotnost  $m_{celk}$ :

$$m_{celk} \cong 430 \text{ kg}$$

Tíhová síla od náplně a výsypky  $F_{Gz}$ :

$$F_{Gz} = m_{celk} g = 430 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} = 4218,3 \text{ N} \quad (4.24)$$

Napětí ve svaru je tedy:

$$\sigma_{ps} = \frac{F_{Gz}}{s_{ps} l_{ps}} = \frac{4218,3 \text{ N}}{2 \text{ mm} \cdot 400 \text{ mm} \cdot 4} = 1,318 \text{ MPa} \quad (4.25)$$

Kde:

$l_{ps}$  [m]

délka přechodového svaru

$s_{ps}$  [m]

účinná tloušťka přechodového svaru

Porovnání se sníženou mezí kluzu (stejný typ namáhání jako stěnový svar):

$$\begin{aligned} 0,7R_{p0,2} &> \sigma_{ps} \\ 130,2 \text{ MPa} &> 1,318 \text{ MPa} \end{aligned} \quad (4.26)$$

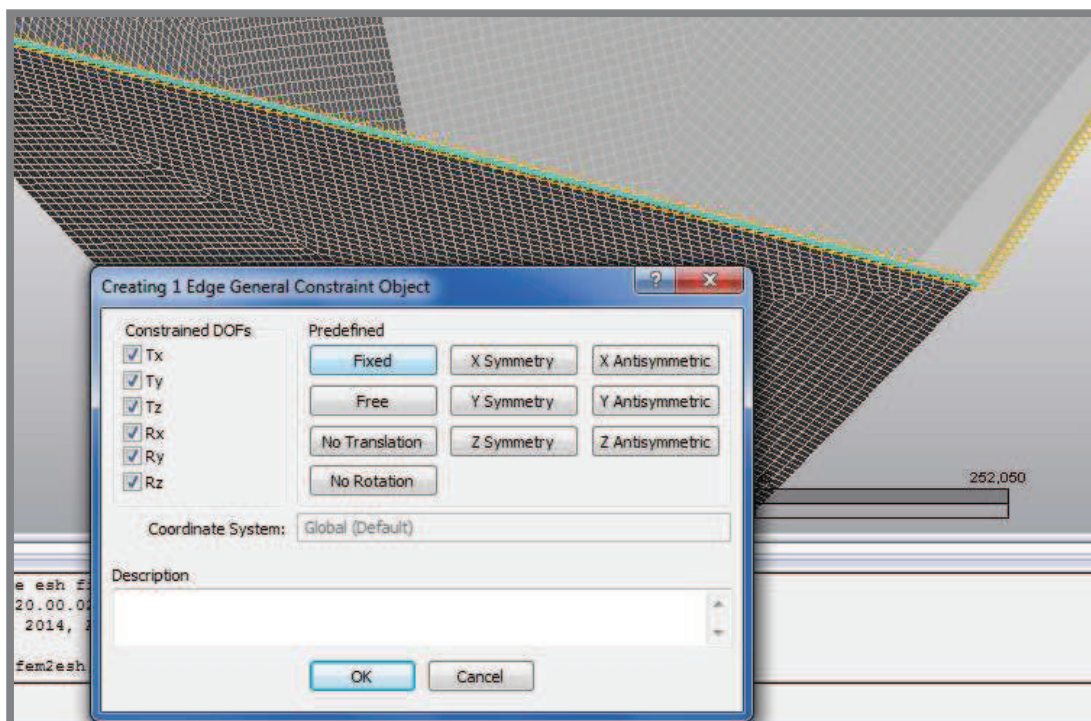
Tento svar je taky značně naddimenzován. Z výše zmíněných důvodů není uvažován součinitel koncentrace napětí.

#### 4.4 Pevnostní výpočty – Metoda konečných prvků

Napětí ve výsypce již nelze jednoduše analyticky stanovit. Proto je použit výpočet pomocí metody konečných prvků, provedený v programu *Autodesk Simulation Mechanical 2015*.

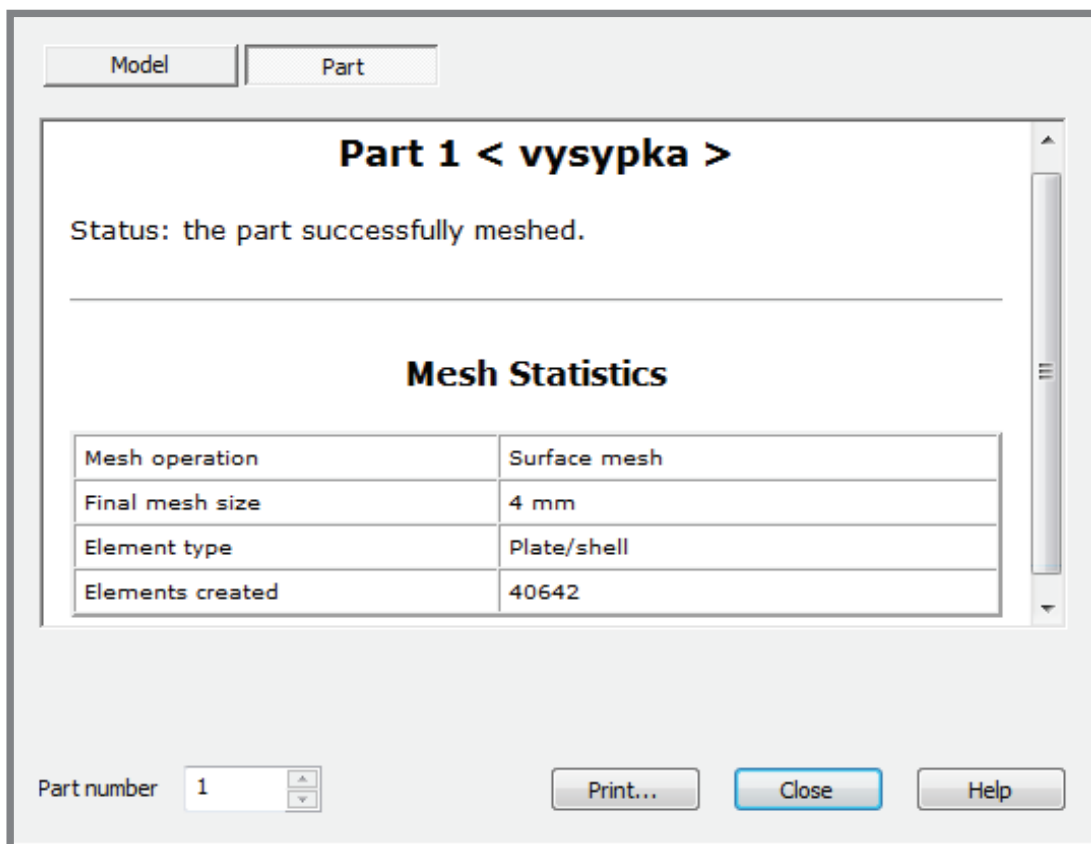
Modelovým tělesem je pouze výsypka bez svislé horní části, vmodelovaná v programu *Autodesk Inventor 2015*. Zatížení je realizováno hydrostatickým tlakem s hustotou kapaliny  $8000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  a s výškou hladiny 222 mm nad horním okrajem výsypky.

Na něm jsou zavedeny okrajové podmínky fixní vazbou ve všech směrech. Tyto okrajové podmínky vycházejí z předpokladu, že přechod bude zpevněn přivařením jeklu a proto jej lze považovat za dostatečně tuhý a tudíž velice obtížně deformovatelný.

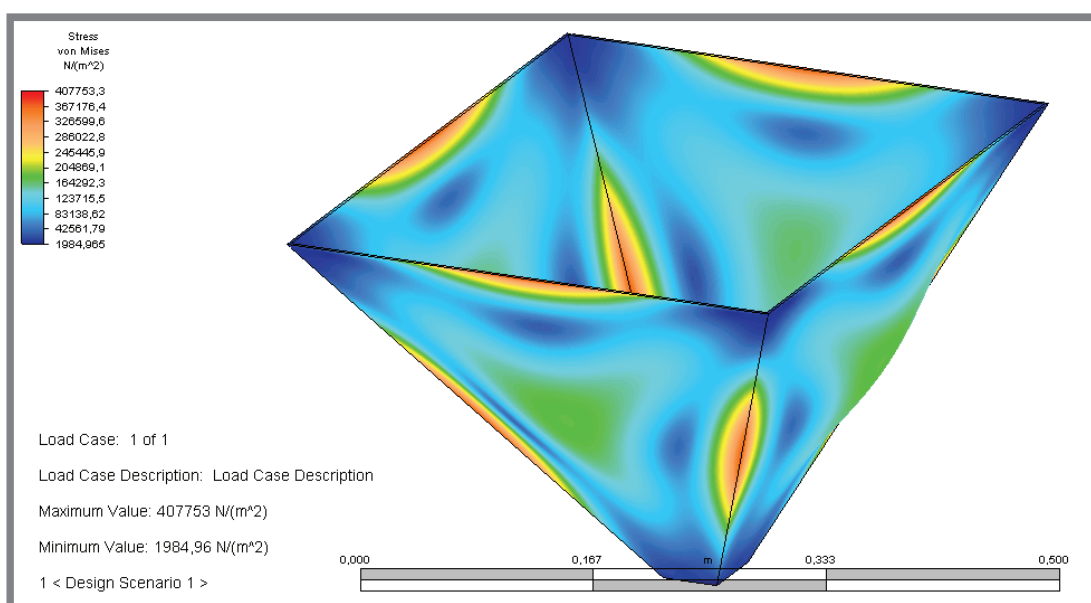


Obr. 4.4 Nastavení okrajových podmínek

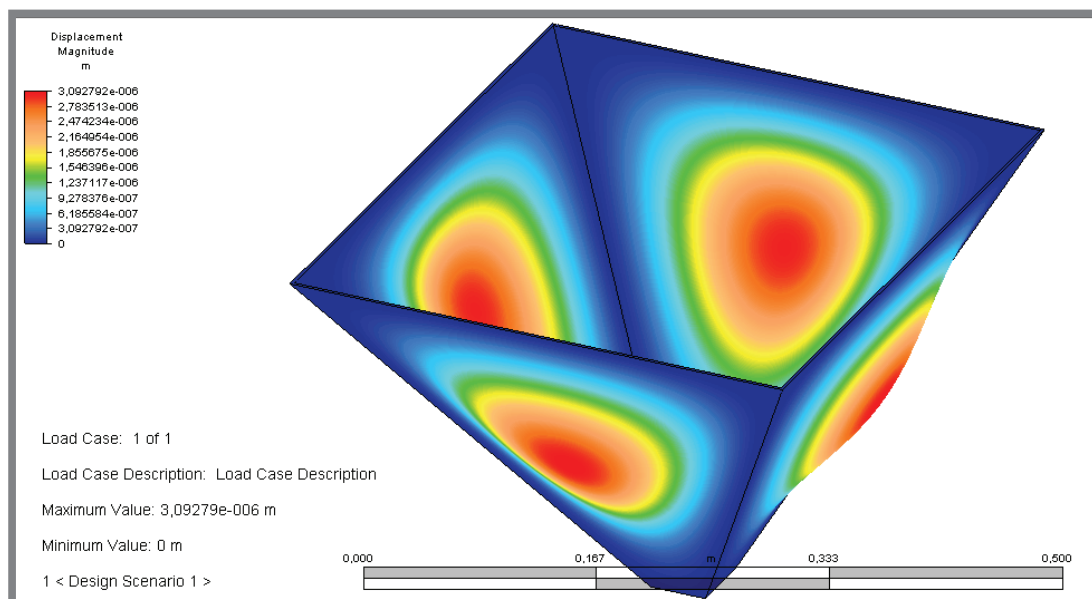
Bylo provedeno několik iterací výpočtu s různou sítí. Poslední iterace má síť vytvořenu pomocí prvků plechu/skořepiny. Její charakteristické údaje jsou zřejmé z obr. 4.5. Poslední iterace byla také externě ověřena v programu *ANSYS*.



Obr. 4.5 Charakteristiky finální sítě



Obr. 4.6 Redukované napětí ve výsypce



Obr. 4.7 Celkové posunutí ve výsypce

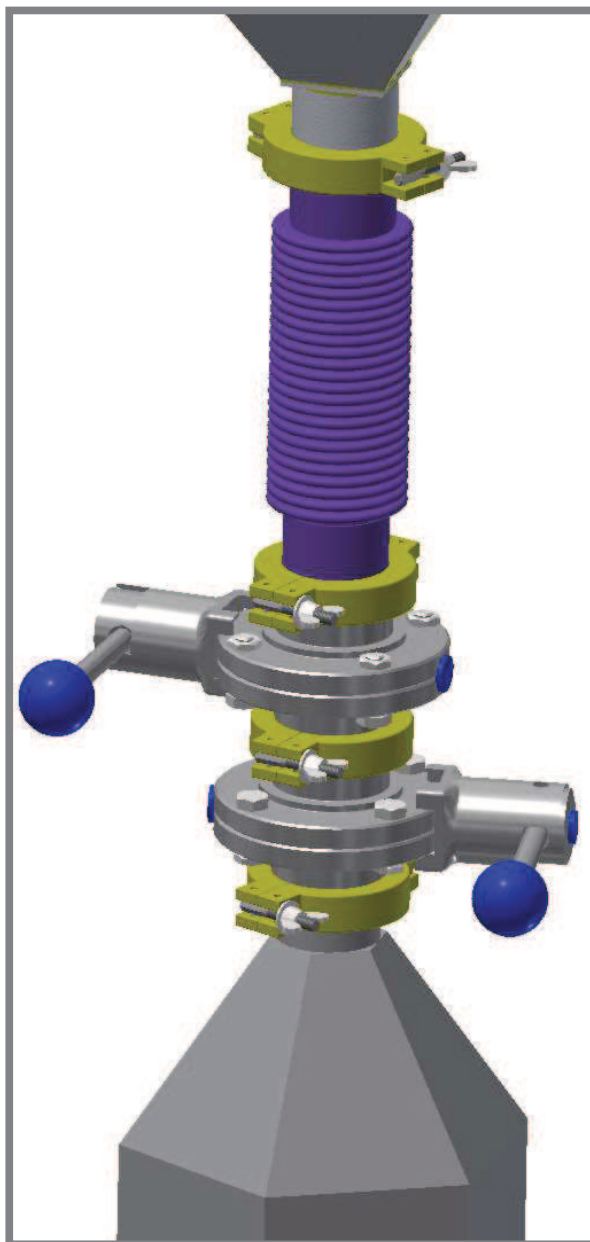
Maximální hodnoty redukovaného napětí jsou v řádech desetin MPa, konkrétně 0,407 MPa. Výsledné napětí bude v tomto místě větší, neboť se zde projeví ještě vrubový faktor svaru, ale i tak je toto napětí zanedbatelné v porovnání s mezí kluzu materiálu.

Analogicky dopadlo celkové posunutí, kdy maximum je 3,1  $\mu\text{m}$ .

Provedená simulace tedy potvrdila předpokládanou tuhost celé konstrukce a ta může být prohlášena za bezpečnou, vzhledem k meznímu stavu pružnosti.

## 4.5 Spojení nádob a způsob určování obsahu

Spojení zásobníku a transportního kontejneru je realizováno pružným prvkem. Ten se skládá z vlnovce, který je pomocí hrdla (viz obr. 4.1) spojen se zásobníkem a na druhé straně stejným způsobem připojen k ventilu. Ten je již pomocí objímky připevněn k ventilu na transportním kontejneru. Toto pružné propojení umožňuje vážit pouze malý kontejner. Jeho vážení je zajištěno instalací osobní váhy ORAVA EV-5G [22], která dokáže vážit od 2 kg a měla by být schopna kontinuálního vážení nebo alespoň po malých úsecích. Správný způsob používání váhy nepovede nikdy k jejímu přetížení, neboť výrobce udává její maximální nosnost 150 kg. Přesný postup vážení a přesypávání bude muset být vyzkoušen až v praxi na konkrétním materiálu.



Obr. 4.8 Řešení spojení nádob pomocí vlnovce

#### 4.6 Rámová konstrukce

4.6

---

Materiál rámové konstrukce byl zmíněn již na začátku kapitoly 4. Pevnostní výpočet nebyl prováděn, neboť příhradová konstrukce svařená z jeklů má dostatečnou tuhost a zatížení není tak velké, aby způsobilo jakýkoliv mezní stav.

Rozměry celé konstrukce se odvíjí od rozměrů zásobníku, výšky transportního kontejneru a spojovací sestavy mezi nimi.

Jelikož je zásobník široký 400 mm, je rám navržen tak, aby bylo možno jej s dostatečnou vůlí (2 mm) do rámu vložit. To dává dohromady s jeklem o šířce průřezu 40 mm celkovou šířku rámu 484 mm.



Výška rámu  $h_{ram}$  je spočítána jako součet:

$$\begin{aligned} h_{ram} &= h_k + h_{vent} + h_{vln} + h_{v+} + h_{vah} + t_{pl} = \\ &= 343 \text{ mm} + 140 \text{ mm} + 185 \text{ mm} + 348 \text{ mm} + 20 \text{ mm} + 2 \text{ mm} = \\ &= 1038 \text{ mm} \end{aligned} \quad (4.27)$$

Kde:

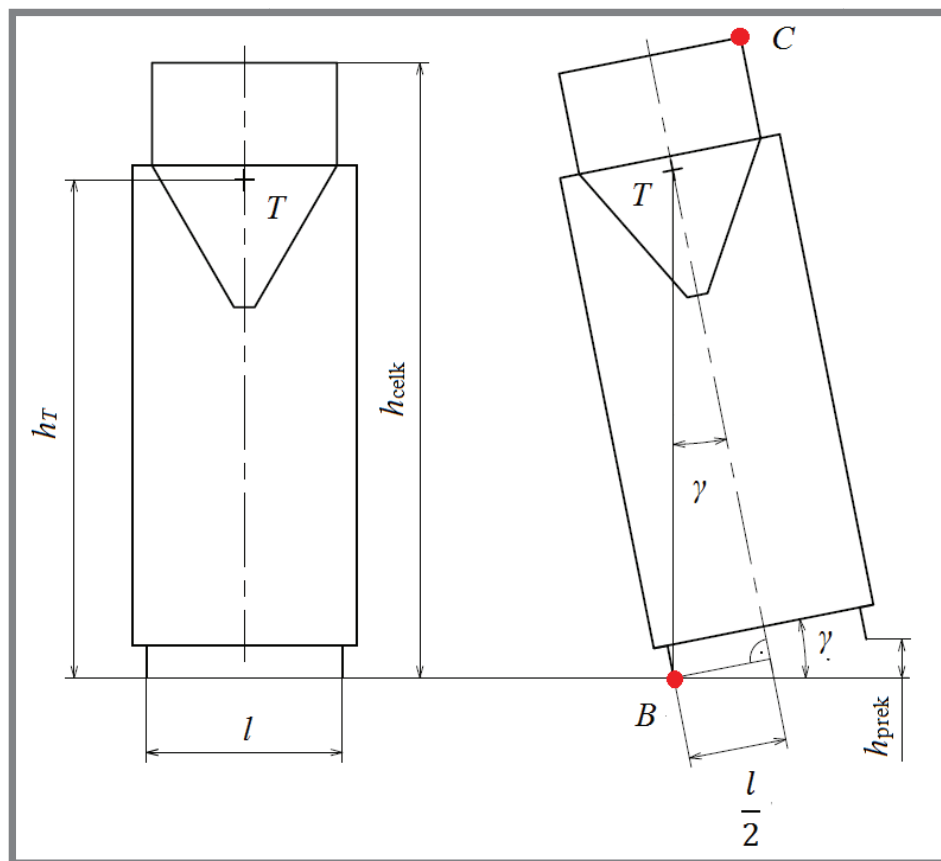
$h_k$ [m]	výška transportního kontejneru
$h_{vln}$ [m]	délka vlnovce s koncovkami
$h_{v+}$ [m]	výška výsypky a připojovacího hrdla
$h_{vah}$ [m]	výška váhy
$t_{pl}$ [m]	tloušťka plechu dna

Rozhodujícím faktorem u této konstrukce není analýza z pohledu pružnosti a pevnosti ale z pohledu statiky. Protože je rám relativně štíhlý a vysoký a většina hmotnosti spočívá v jeho horní části, je nutné zkontrolovat náchylnost k převrácení.

Pro analýzu je uvažována situace, kdy je zásobník naplněn nerezovým práškem jako v případě pevnostní analýzy a není zde připojen transportní kontejner na horní ani spodní ventil. Absence spodního kontejneru posouvá výpočet na bezpečnou stranu, zatímco nepřítomnost horního ventilu na stranu zápornou. Nepočítá se ale s manipulací při připojení kontejneru na horní ventil.

Do výpočtu jsou započteny pouze hmotnosti náplně (419 kg), zásobníku (17 kg) a rámové konstrukce (37,5 kg) a to vždy v místě jejich těžišť. Hmotnosti ostatních částí lze v porovnání s uvažovanými zanedbat. Polohy těžišť jsou určeny pomocí nástroje v programu *Autodesk Inventor 2015*. Dle [19] byla vypočtena poloha celkového těžiště  $h_T$ . Mezní úhel naklopení je vypočten z podmínky labilní rovnováhy, kdy je těžiště na jedné svislici s bodem otáčení, v tomto případě bodem  $B$ , což je bod dotyku kolečka a podložky.





Obr. 4.9 Statický rozbor

Maximální úhel náklonu konstrukce  $\gamma$ :

$$\gamma = \tan^{-1} \frac{l}{2h_T} = \tan^{-1} \frac{424 \text{ mm}}{2 \cdot 1078 \text{ mm}} = 11,26^\circ \quad (4.28)$$

Kde:

$l$  [m]

rozchod středů koleček

Maximální výška překážky  $h_{\text{prek}}$ :

$$h_{\text{prek}} = \sin(\gamma)l = \sin(11,26^\circ) \cdot 424 \text{ mm} = 81,82 \text{ mm} \quad (4.29)$$

K takovému náklonu může dojít nejen najetím na překážku, ale také silovým působením, v nejhorším případě vodorovnou silou v místě  $C$ . Její velikost lze vypočítat z momentové rovnováhy k bodu  $B$ :

$$h_{\text{celk}} = h_{\text{ram}} + h + h_{\text{kol}} = 1038 \text{ mm} + 222 \text{ mm} + 71 \text{ mm} = 1331 \text{ mm} \quad (4.30)$$

$$F_G = mg = 473,5 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} = 4645 \text{ N} \quad (4.31)$$

$$F_G \frac{l}{2} = F h_{\text{celk}} \quad (4.32)$$

$$F = F_G \frac{l}{2h_{\text{celk}}} = 4645 \text{ N} \frac{0,424 \text{ m}}{2 \cdot 1,331 \text{ m}} = 739,85 \text{ N}$$

Kde:

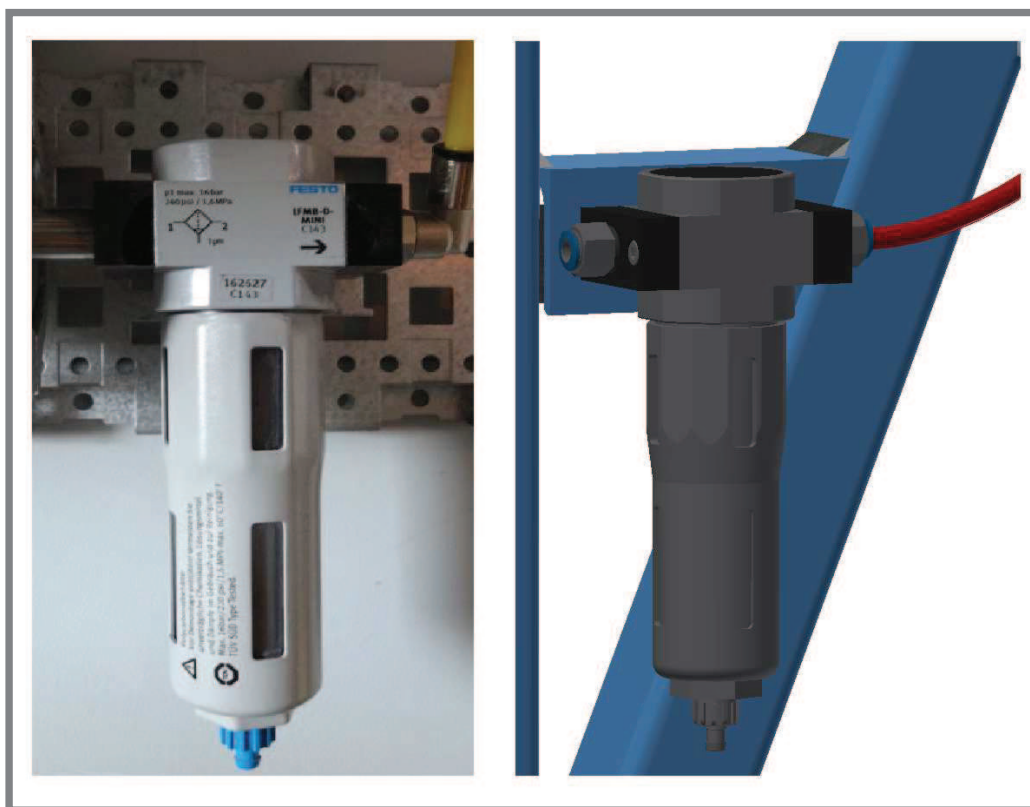
$F_G$ [N]	výpočtová tíhová síla celé konstrukce
$h_{celk}$ [m]	výška celého zařízení
$h_{kol}$ [m]	zástavbová výška koleček
$m$ [kg]	výpočtová hmotnost celé konstrukce

## 4.7 Inertní atmosféra

Pro přívod inertní atmosféry byla zvolena varianta, která byla jako poslední popsána v koncepčním řešení. Jde o přívod dusíku pomocí uzavíracího ventilu umístěného na víku zásobníku. Vzduch je odváděn sadou osmi L-spojek, které jsou pravidelně rozmístěny po výšce zásobníku. První je umístěna tak, aby bylo možné zásobník naplnit inertní atmosférou i při jeho naplnění na plnou kapacitu, tj. 100 kg hliníkového prášku.

Vzduch je poté veden soustavou plastových hadic o vnějším průměru 6 mm k uzavíracím ventilům, které jsou umístěny na přední straně rámu z důvodu snadné obsluhy. Od nich jsou pak jednotlivé cesty svedeny do rozdělovacích spojek a následně do konečné T-spojky, z které jde již jen jedna hadice do filtru pevných částic Festo LFMB – D – MINI, který je stejný jako na zařízení tiskárny (viz obr. 4.8).

Konstrukce je osazena komponentami značky Festo [23], které jsou známy svou vysokou kvalitou a spolehlivostí. Jejich nevýhodou je vysoká pořizovací cena. Proto se do cenového přehledu počítá s použitím alternativních dílů jiného výrobce, konkrétně Pneumatic & Hydraulic Company, llc. Ceny jsou uvedeny podle internetového obchodu *kompresory-vzduchotechnika.cz* [24]



Obr. 4.10 Stejný filtr použit v tiskárně i v návrhu

## 5 DISKUZE

V kapitole 2.1 jsou formulovány nedostatky v současnosti komerčně nabízených kontejnerů. Je to hlavně nemožnost plnit zásobník inertní atmosférou a absence jakékoliv možnosti zjištění stavu zásobníku.

Navrhovaná konstrukce řeší oba tyto problémy ovšem s určitými předpoklady, které bude nutné ověřit v praxi. Jde zejména o nebezpečí usazování metalického prášku na plexiskle a tím zabránění vzhledu do zásobníku a ověření efektivity pneumatických rozvodů vzduchu.

Dalším prvkem návrhu, který s sebou nese určitá rizika, je vážení transportního kontejneru. Je totiž závislé na výběru konkrétní osobní váhy, popřípadě nesplnění požadavků, které na ni budou kladeny, jako je dostatečně rychlé vyhodnocování zátěže a minimální měřitelná hmotnost. To ale není otázka konstrukce zásobníku, nýbrž nákupu vhodných komponent.

Co se týče konstrukce zásobníku, výpočty potvrdily jeho dostatečnou tuhost i pevnost. Kritická místa jsou značně předimenzována, především z důvodu spolehlivé a bezpečné konstrukce, která je schopna bez problémů snášet i hrubší zacházení.

Statický rozbor rámu přinesl jednu neočekávanou informaci. Při dodatečném použití koleček od firmy Blickle [25] se zvýšila maximální výška možné bezpečné překážky na cca 82 mm, což je více, než je světlost dna rámu. Z toho vyplývá, že při normálním provozu nemůže dojít k tomu, že kolečko najede na vyšší překážku než je 71 mm a tudíž všechny možné překážky, které přijdou kolečku do cesty jsou v bezpečné oblasti. Také síla potřebná k převržení zásobníku vzrostla na přibližně 740 N. To by měla být dostatečná rezerva na to, aby nebyl zásobník převržen omylem nebo náhodou. Pokud již někdo vyvine takovou sílu, má většinou v úmyslu zásobník převrátit.

---

## 6 ZÁVĚR

Tato práce se zabývá návrhem skladovacího kontejneru na práškové kovy. V úvodu je objasněn pojem zásobník a jsou zde uvedeny normy zabývající se zásadami jeho konstrukce. Společně s nimi jsou zmíněna také doporučení týkající se skladování a manipulace s práškovým hliníkem a titanem. Dále je zde obsažen stručný přehled nabízených produktů v této oblasti a je zde vysvětlena nevhodnost tohoto sortimentu. Na rešeršní část navazuje analýza zamýšleného použití a jsou zde stanoveny prvotní konstrukční předpoklady, na jejichž základě jsou poté formulovány cíle další práce. Následuje oddíl věnovaný představení různých konceptů řešení jednotlivých konstrukčních uzlů a jsou zde uvedeny jejich výhody a nevýhody. Na tuto kapitolu navazuje konkrétní návrh konstrukce spolu s rozměrovými, pevnostními a statickými výpočty. V závěrečné diskuzi je zhodnoceno řešení jednotlivých částí.

Zásobník, tak jak je navržen, splňuje všechny požadavky, které byly kladeny na jeho konstrukci. Vždy byla vybrána optimální varianta jak z hlediska funkčního, tak ekonomického. Příkladem může být volba způsobu vážení, kdy při finálním výběru komponenty jasně převážil požadavek nízkých nákladů. Zároveň to ale není na úkor funkčnosti tohoto řešení. Dá se tedy říct, že cíle práce tak jak byly formulovány, byly splněny.

Zároveň se zde otevírá prostor k dodatečnému vývoji. Během řešení přívodu inertní atmosféry byly navrženy koncepty, jejichž bezproblémová funkčnost se nedá jednoduše ověřit, ale skýtají potenciál k efektivnějšímu řešení odvodu vzduchu. Zde je ale zapotřebí minimálně simulace ve specializovaném softwaru, nebo přímo experimentální ověření. To je již ale nad rámec této bakalářské práce a tak bylo po konzultaci s jejím vedoucím rozhodnuto o použití konstrukčně jednodušší varianty, která je mírně náročnější na provoz a obsluhu.

## 7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

7

- [1] *Material Safety Data Sheet: Material Name: LPW-7075-5*. Runcorn, Cheshire, United Kingdom: 27.8.2014
- [2] MALÝ, Stanislav a kol. *Prevence pracovních rizik. Díl II*. Praha : VÚBP, 2009. 103 s. ISBN 978-80-86973-79-1.
- [3] THE ALUMINIUM ASSOCIATION. *Recommendations for storage and handling of aluminium powders and paste* [online]. 27.2.2014 [cit. 2014-10-30].  
<<http://www.aluminum.org/sites/default/files/Safe%20Handling%20of%20Powder%20and%20Paste.pdf>>
- [4] CRISTAL METALS INC. *Powder Handling Guidelines for Working with Titanium Powder* [online]. 27.8.2012 [cit. 2015-2-18].  
<[http://cristalmetals.com/docs/CM\\_Powder\\_Handling\\_8-27\\_FINAL.pdf](http://cristalmetals.com/docs/CM_Powder_Handling_8-27_FINAL.pdf)>
- [5] MIŠKANIČ, Michal. *Metody zdolávání požárů za přítomnosti práškových a alkalických kovů* [online]. 4.2.2015 [cit. 2015-2-18].  
<<http://metodika.cahd.cz/konspekty/2-03.pdf>>
- [6] ČSN 73 5570. *Navrhování konstrukcí zásobníků*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1999.
- [7] ČSN EN 1991-4: *Zatížení konstrukcí - Část 4: Zatížení zásobníků a nádrží*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2008.
- [8] *Obal centrum*. [online]. [cit. 2015-3-5]. <<http://www.obal-centrum.cz/plastove-sudy-s-vikem/plastove-sudy-se-sirokym-hrdlem-a-sroubovacim-vikem>>
- [9] *REO AMOS*. [online]. [cit. 2015-3-5]. <<http://reoamos.scostry.cz/sud-na-nebezpecne-latky-plastovy-30-l/d-3738/>>
- [10] *NIRO - INOX s.r.o.* [online]. [cit. 2015-5-5]. <<http://www.niro-inox.cz/produkty-kontejnery>>
- [11] *SCHÄFER Container systems*. [online]. [cit. 2015-3-5].  
<<http://www.schaefer-container-systems.cz/cz/products/stainless-steel-special-containers/>>
- [12] *Flexicon*. [online]. [cit. 2015-3-5].  
<<http://www.roliol.cz/content/files/flexicon.pdf>>
- [13] MEDEK, Jaroslav. *Mechanické pochody*. 3. přeprac. vyd. Brno: PC-DIR Real, 1998, 217 s. ISBN 80-214-1264-X.
- [14] *SLM Solitions* [online]. [cit. 2014-10-30]. <[http://stage.slm-solutions.com/index.php?index\\_en](http://stage.slm-solutions.com/index.php?index_en)>
- [15] MIKULČÁK, Jiří. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky a vzorce pro střední školy*. 1. vyd. Praha: Prometheus, 2003, 276 s. ISBN 80-7196-264-3.
- [16] *HBP měřicí technika s.r.o.* [online]. [cit. 2015-2-12]. <<http://www.hbm.cz/>>
- [17] *DINEL, s.r.o.* [online]. [cit. 2014-12-7]. <<http://www.dinel.cz/vyroby>>
- [18] *Ferona a.s.* [online]. [cit. 2015-1-18].  
<<http://www.ferona.cz/cze/katalog/strom.php>>
- [19] FLORIAN, Zdeněk, Emanuel ONDRÁČEK a Karel PŘIKRYL. *Mechanika těles: Statika*. Vyd. 7. v Akademickém nakladatelství CERM 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007, 182 s. ISBN 978-80-214-3440-0.

- [20] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE, Richard G. (Richard Gordon) BUDYNAS, Martin HARTL a Miloš VLK. *Konstruování strojních součástí*. 1. vyd. Brno: VUTUM, 2010, 1159 s. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [21] ČSN 41 7240. *Ocel 17 240 Cr-Ni*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1973.
- [22] ORAVA. [online]. [cit. 2015-5-6]. <<http://www.orava.eu/produkty/osobna-starostlivost-a-zdravie/osobne-vahy/item/491-digitalna-osobna-vaha-ev-5-g>>
- [23] Festo, s.r.o. [online]. [cit. 2015-5-9]. <[http://www.festo.com/cms/cs\\_cz/9515.htm](http://www.festo.com/cms/cs_cz/9515.htm)>
- [24] KOMPRESORY A VZDUCHOTECHNIKA konstrukce a výroba jednoúčelových strojů a automatizační techniky. [online]. [cit. 2015-5-12]. <<https://www.kompresory-vzduchotechnika.cz/c/shop/spojovaci-material/plastove-nastrcne-spojky-modre>>
- [25] BLICKLE we innovate mobility. [online]. [cit. 2015-5-15]. <<http://www.blickle.cz/cz/>>
- [26] HEINRICH KIPP WERK KG. [online]. [cit. 2015-5-2]. <<http://www.kipp.cz/cz/cs/Produkty/Ovládací-prvky-normované-díly/Stahovací-spony.html>>
- [27] NerezMaterial.cz. [online]. [cit. 2015-5-2]. <<http://www.nerezmaterial.cz/produkty>>
- [28] RATTAY steel in motion. [online]. [cit. 2015-5-8]. <<http://www.rattay.cz/produktove-portfolio>>
- [29] SVOBODA, Pavel, Jan BRANDEJS a František PROKEŠ. *Výběry z norem pro konstrukční cvičení*. vyd. 2. Brno: CERM, 2011, 227 s. ISBN 978-80-7204-751-2.
- [30] SVOBODA, Pavel. *Základy konstruování*. Vyd. 2., dopl. a přeprac. Brno: CERM, 2011, 234 s. ISBN 978-80-7204-750-5.

## 8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

8

3D	trojrozměrný
$\alpha$ [°]	úhel odklonu stěny výsypky od vodorovné roviny
$a$ [m]	délka hrany zásobníku
$A$ [m <sup>2</sup> ]	plocha vnitřního průřezu buňky
$\beta$ [°]	úhel odklonu stěny výsypky od svislé roviny (sypný úhel)
$b$ [m]	délka delší hrany zásobníku s obdélníkovým průřezem
$B$	horní okraj zásobníku
$\gamma$ [°]	maximální povolené naklonění zásobníku
$C$	bod dotyku kolečka a podložky
$d$ [m]	průměr buňky
$d_c$ [m]	charakteristický rozměr zásobníku
$d_{ekv}$ [m]	průměr myšlenkového válce o stejné ploše jako má průřez zásobníku
$d_{vytex}$ [m]	vnější průměr hrdla na výtakovém otvoru
$d_{vytin}$ [m]	vnitřní průměr hrdla na výtakovém otvoru
$\varepsilon$ [°]	úhel hrany výsypky
EN	evropská norma
$\varphi$ [°]	úhel vnitřního tření
$\varphi_w$ [°]	třecí úhel mezi materiálem a stěnou zásobníku
$F_G$ [N]	výpočtová tíhová síla celé konstrukce
$F_{Gz}$ [N]	tíhová síla od celkové zatěžovací hmotnosti
$F_h$ [N]	horizontální tlaková síla
$g$ [m/s <sup>2</sup> ]	tíhové zrychlení
$h$ [m]	výška komory buňky
$h_c$ [m]	výška části zásobníku se svislými stěnami od přechodu k ekvivalentnímu povrchu
$h_{celk}$ [m]	výška celého zařízení
$h_{ekv}$ [m]	výška myšlenkového válce o stejném objemu jako má sypný kužel
$h_k$ [m]	výška transportního kontejneru
$h_{kol}$ [m]	zástavbová výška koleček
$h_{rov}$ [m]	výška materiálu v rovině části bez výšky sypného kužele
$h_p$ [m]	výška přídatku
$h_{prek}$ [m]	výška překážky
$h_{ram}$ [m]	výška rámové konstrukce
$h_{sk}$ [m]	výška sypného kužele
$h_T$ [m]	výška těžiště
$h_v$ [m]	výška výsypky
$h_{v+}$ [m]	výška výsypky a připojovacího hrdla
$h_{vah}$ [m]	výška váhy
$h_{vent}$ [m]	výška ventilové soustavy
$h_{vln}$ [m]	délka vlnovce s koncovkami
$h_z$ [m]	celková výška zásobníku
$k$	koeficient bočního napětí
$l$ [m]	rozchod středů koleček
$l_{ps}$ [m]	délka přechodového svaru

$l_{ss}$ [m]	délka stěnového svaru
$m$ [kg]	výpočtová hmotnost celé konstrukce
$m_{Al}$ [kg]	hmotnost hliníkového prášku
$m_{celk}$ [kg]	zatěžovací hmotnost přechodového svaru
$m_{ner}$ [kg]	hmotnost nerezového prášku
$N_2$	dusík
$NaCl$	chlorid sodný
$p_{hmax}$ [Pa]	maximální horizontální tlak
$p_{hstred}$ [Pa]	střední horizontální tlak
$p_{vmax}$ [Pa]	maximální vertikální tlak
$\rho_{Al}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	hustota hliníku
$\rho_{ner}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	hustota nerezové oceli
$r$ [m]	poloměr kruhového zásobníku
$R_{p0,2}$ [Pa]	smluvní mez kluzu
$\sigma_{ps}$ [Pa]	napětí v přechodovém svaru
$\sigma_{ss}$ [Pa]	napětí ve stěnovém svaru
$s_{ps}$ [m]	účinná tloušťka přechodového svaru
$s_{ss}$ [m]	účinná tloušťka stěnového svaru
$S$ [m <sup>2</sup> ]	plocha vnitřního průřezu výsypky při jejím dně
SBR 65	butadien-styrenový kaučuk
SLM	Selective Laser Melting
$S_{sten}$ [m <sup>2</sup> ]	plocha svislé stěny zásobníku
$\theta_h$ [°]	doplňkový úhel
$t$ [m]	tloušťka stěny zásobníku
$T$	těžiště
$t_{pl}$ [m]	tloušťka plechu dna
$V_{Al}$ [m <sup>3</sup> ]	objem hliníku
$V_{celk}$ [m <sup>3</sup> ]	celkový objem zásobníku
$V_{rov}$ [m <sup>3</sup> ]	objem hliníku v rovné části bez objemu sypného kužele
$V_{sk}$ [m <sup>3</sup> ]	objem sypného kužele
$V_v$ [m <sup>3</sup> ]	objem výsypky



**9 SEZNAM OBRÁZKŮ****9**

<b>Obr. 1.1</b>	Povolené tvary průřezů	17
<b>Obr. 1.2</b>	Plastové sudy Curtec s širokým hrdlem série 6900	18
<b>Obr. 1.3</b>	Sud na nebezpečné látky	19
<b>Obr. 1.4</b>	Nerezové kontejnery firmy NIRO-INOX s přívodem inertního plynu	19
<b>Obr. 1.5</b>	Speciální nerezové nádrže Schäffer	20
<b>Obr. 1.6</b>	Kompletní zařízení Flexicon	20
<b>Obr. 2.1</b>	Standardní ventil používaný na transportních nádobách	22
<b>Obr. 2.2</b>	Zvedací dno	23
<b>Obr. 2.3</b>	Vačkový mechanismus	23
<b>Obr. 2.4</b>	Použití vlnovce	24
<b>Obr. 3.1</b>	Návrhy tvarů zásobníku	26
<b>Obr. 3.2</b>	Ucho pro montáž na rám	27
<b>Obr. 3.3</b>	Obvodový věnec z jechlů	27
<b>Obr. 3.4</b>	Varianty umístění těsnění mezi víkem a jeho dosedací plochou	28
<b>Obr. 3.5</b>	Díry pro šrouby ve víku i nádobě	28
<b>Obr. 3.6</b>	Součást pro vyvození předpětí použitá na přesívacím zařízení	29
<b>Obr. 3.7</b>	Modifikace napínacího prvku	29
<b>Obr. 3.8</b>	Použití průhledítka	30
<b>Obr. 3.9</b>	Návrh uložení na pružinách	31
<b>Obr. 3.10</b>	Sada odváděcích hadic na zadní stěně zásobníku	32
<b>Obr. 3.11</b>	Varianty rámových konstrukcí	33
<b>Obr. 3.12</b>	Schéma posuvného dna	34
<b>Obr. 3.13</b>	Konstrukční řešení posuvného dna	35
<b>Obr. 4.1</b>	Rozměry zásobníku	37
<b>Obr. 4.2</b>	Koncovka nutná k připojení standardního ventilu	38
<b>Obr. 4.3</b>	Ověřovaná geometrie výsypky	40
<b>Obr. 4.4</b>	Nastavení okrajových podmínek	44
<b>Obr. 4.6</b>	Redukované napětí ve výsypce	45
<b>Obr. 4.5</b>	Charakteristiky finální sítě	45
<b>Obr. 4.7</b>	Celkové posunutí ve výsypce	46
<b>Obr. 4.8</b>	Řešení spojení nádob pomocí vlnovce	47
<b>Obr. 4.9</b>	Statický rozbor	49
<b>Obr. 4.10</b>	Stejný filtr použit v tiskárně i v návrhu	50

---

## 10 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Cenový přehled použitého materiálu a kupovaných součástí
Příloha 2	Výkresová dokumentace